



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

AERODYNAMICKÁ ŘEŠENÍ PODLAH ZÁVODNÍCH VOZŮ

AERODYNAMICS OF RACE CAR UNDERBODIES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Tomáš Martinek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Čavoj

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství
Student: **Tomáš Martínek**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Ondřej Čavoj**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Aerodynamická řešení podlah závodních vozů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Rešerše běžně využívaných řešení spodních částí závodních vozů za účelem využití přísavného efektu.

Cíle bakalářské práce:

1. Vysvětlíte přísavný efekt.
2. Uvedte příklady tvarů podlah využívajících přísavný efekt a zdůvodněte je.

Seznam literatury:

Katz, J. (2006): Race Car Aerodynamics. Bentley Publishers, Cambridge.

McBeath, S. (2006): Competition Car Aerodynamics. Haynes Publishing, Sparkford.

Zhang, X., Toet W. and Zerihan J. (2006): Ground Effect Aerodynamics of Race Cars. Applied Mechanics Reviews, Vol. 59, pp. 33-49, DOI:10.1115/1.2110263.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Václav Píštěk, DrSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty



ABSTRAKT

Cílem této práce je objasnit podstatu přítlačné síly vznikající přísavným efektem. Náplní je teoretické popsání základního jevu, vysvětlení vzniku přísavného efektu na okruzích a následné uvedení příkladů vozů, využívající tento jev.

KLÍČOVÁ SLOVA

aerodynamika vozidel, přísavný efekt, vztlak, přítlak, odpor

ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is clarifying principle of downforce, which is originating by ground effect. The thesis consist of theoretic description of this phenomen, explanations of ground effect on the racing circuit and presentation of several examples working with this effect.

KEYWORDS

automotive aerodynamics, ground effect, lift, downforce, drag



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MARTINEK, T. *Aerodynamická řešení podlah závodních vozů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 51 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Čavoj.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Ondřeje Čavoje a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 25. května 2016

.....

Tomáš Martinek



PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Ondřeji Čavojovi, za cenné rady, připomínky a ochotu při vypracování bakalářské práce.



OBSAH

Úvod	9
1 Formulace problematiky a vysvětlení teorie	10
1.1 Aerodynamika a tvar vozu	10
1.2 Silové účinky proudění	11
1.3 Vlastnosti tekutin	12
1.3.1 Viskozita tekutin.....	12
1.3.2 Laminární a turbulentní proudění	13
1.3.3 Reynoldsovo číslo	14
1.3.4 Proudnice	14
1.4 Mezní vrstva	15
1.5 Bernolliho rovnice	15
1.6 Venturiho trubice	16
1.7 Tlakový koeficient	17
1.7.1 Tlakový průběh okolo tvarového tělesa	18
1.8 Určení koeficientů aerodynamických sil	18
2 Přísavný efekt	20
2.1 Definice přísavného efektu	20
2.2 Historie přísavného efektu	21
2.3 Význam přísavného efektu	22
2.4 Jednotlivé faktory přísavného efektu	23
2.4.1 Světla výška a náklon podvozku	23
2.4.2 „Drsnost“ podlahy	26
2.4.3 Navržení vhodného tvaru podvozku.....	27
2.4.4 Přední část vozu.....	30
2.4.5 Utvařeče vírů	33
2.5 Vlivy rušící přísavný efekt.....	34
3 Přehled vozů využívající přísavný efekt.....	36
3.1 Chaparral 2j.....	36
3.2 Lotus 78	37
3.3 Brabham BR46B.....	37
3.4 Lotus 79	38
3.5 Red Bull rb7.....	40
3.6 McLaren MP4-26A.....	43
Závěr.....	46
Seznam použitých zkratek a symbolů	49



ÚVOD

V lidech odjakživa přebývá touha soupeřit a porovnávat své síly s ostatními. Nejinak je tomu i v motorsportu, kde se pro srovnání sil využívá nejen dovedností samotného řidiče, ale i kvalit motorem poháněného prostředku, se kterým se závodí. Pro vylepšení výkonu, ovladatelnosti a rychlosti se často využívá mnoho sofistikovaných prvků, které tyto vlastnosti zefektivňují. V této bakalářské práci bude zdůrazněn význam vlivu prostředí okolo závodního vozidla a následné využití obtékání podvozku pro vytvoření přísavného efektu, složky celkové přítláčné síly.

Aerodynamika vozu je nedílnou součástí řešení každého závodního vozidla, a proto se jednotlivé týmy doslova předhánějí, kdo přijde s novým vylepšením. Avšak tyto prvky probíhají vývojem a často narážejí na pravidla Světové automobilové federace, která vydává nařízení omezující účinnost a také tvar jednotlivých součástí. Je to především z důvodů sjednocení podmínek pro jednotlivá vozidla a pro jejich zařazení do skupin, ve kterých soupeří. Dalším důvodem je bezpečnost závodění jak pro samotné jezdce, tak i pro přihlížející diváky. V dnešní době však vycházejí i nařízení spojená se zvýšením efektivnosti a sledovanosti závodění. Do vozů se instalují proměnlivé aerodynamické prvky, u kterých lze přítláčnou sílu měnit během závodění přímo na trati. Napomáhají například při předjíždění, a tak přispívají k ještě větší dramatičnosti závodění, což má za následek větší sledovatelnost.

První kapitola pojednává o teorii spojené s přísavným efektem. Jsou zde objasněny jednotlivé principy, které buď přímo souvisí s vytvořením přísavného efektu, či jej ovlivňují nebo slouží pro výpočítání, respektive naměření potřebných veličin. Druhá kapitola je přímo nazvána přísavný efekt a vysvětluje nejen přísavný efekt samotný, ale i jeho historii nebo jeho jednotlivé formy použité při závodění. Poslední kapitola přináší konkrétní příklady vozů, využívajících pro zvýšení přítláčné síly ve vyšší míře přísavný efekt.

V současné době se stala celková aerodynamika podstatnou záležitostí při návrhu nového, závodního vozu. Prostředí, ve kterém se vůz pohybuje, se tedy využívá ku prospěchu jezdce a nelze jej považovat za jakýsi fakt, který pilotům znesnadňuje zisk vítězství.



1 FORMULACE PROBLEMATIKY A VYSVĚTLENÍ TEORIE

Tato kapitola je věnována objasnění základní teorie spojené s přísavným efektem. Chronologicky jsou zde uvedeny jednotlivé principy i s obrázky pro snadnější pochopení problematiky, a pokud to situace vyžaduje, jsou zde i rovnice, ze kterých jednotlivé definice vycházejí.

1.1 AERODYNAMIKA A TVAR VOZU

Na úvod zde jsou uvedené dva typy formulí z různé doby, obr. 1 a obr. 2. Obě byly konstruovány tak, aby využívaly nejnovějších poznatků pro optimalizaci proudění okolo karoserie a s cílem vyhrát závodily v serii Indycar 500. První vůz, obr. 1, obsahuje jen základní prvky karoserie, které napomáhají snadnějšímu pohybu ve vzdušném prostředí. Obr. 2 znázorňuje velmi vyspělou verzi formule, kde se využívá nespočet aerodynamických prvků pro zvýšení přitlačné síly. Velká část přitlačné síly je získána díky proudění vzduchu pod podvozek formule, kvůli vhodnému tvaru, sklonu a světlé výšce podvozku. Nyní se budu snažit popsat základní principy spojené s prouděním vzduchu, tekutiny, mezi zemí a podvozkem vozu.



Obr. 1 Peugeot v závodu Indycar 500 roku 1916 [1]



Obr. 2 Formule Honda v závodě Indycar 500 roku 2015 [2]

1.2 SILOVÉ ÚČINKY PROUDĚNÍ

Při pohybu vozidla na něj působí mnoho sil, které vznikají v důsledku změn tlaků v jednotlivých sekcích. Často omezují nebo mění chování tohoto pohybu. V běžné praxi se člověk u osobních automobilů setká především s odporem vzduchu. Například, když během jízdy autem vystrčíme ruku z okna a ihned pocítíme vnější síly, vyvolané okolním prostředím. Platí, čím je odpor menší, tím lze dosáhnout vyšší rychlosti. Jedná se o jev, kdy se v přední části vozu nahromadí molekuly vzduchu, vznikne zde určitý typ bloku vzduchu a navýší se tlak, což zapříčiňuje nárůst odporu. Nejvyšší hodnota odpor vzduchu vzniká při odtržení mezní vrstvy proudu od zadní části vozu. Vznikne tím úplav. Menší odpor lze získat při časově delším obtékáním povrchu tělesa, kdy vzniká tření v mezní vrstvě mezi plochou tělesa a tekutinou. Známým tvarem vhodným pro proudění okolo něj je tvar slzy. U závodních vozů je snaha odpor vzduchu snížit na nízkou hodnotu.

Další silovou složkou je vztlak, který může být pozitivní nebo negativní v závislosti na směru jeho působení. Vztlak vozidlo nadlehčuje, zatím co negativního vztlak vůz stlačí k vozovce a je chápán jako přitlak. U osobních automobilů je vztlak tvořen v důsledku poklesu tlaku při obtékání vzduchu na povrchu karoserie. Proto se závodní vozy navrhují s optimálním tvarem karoserie a obsahují mnoho prvků vyvolávající přitlak.

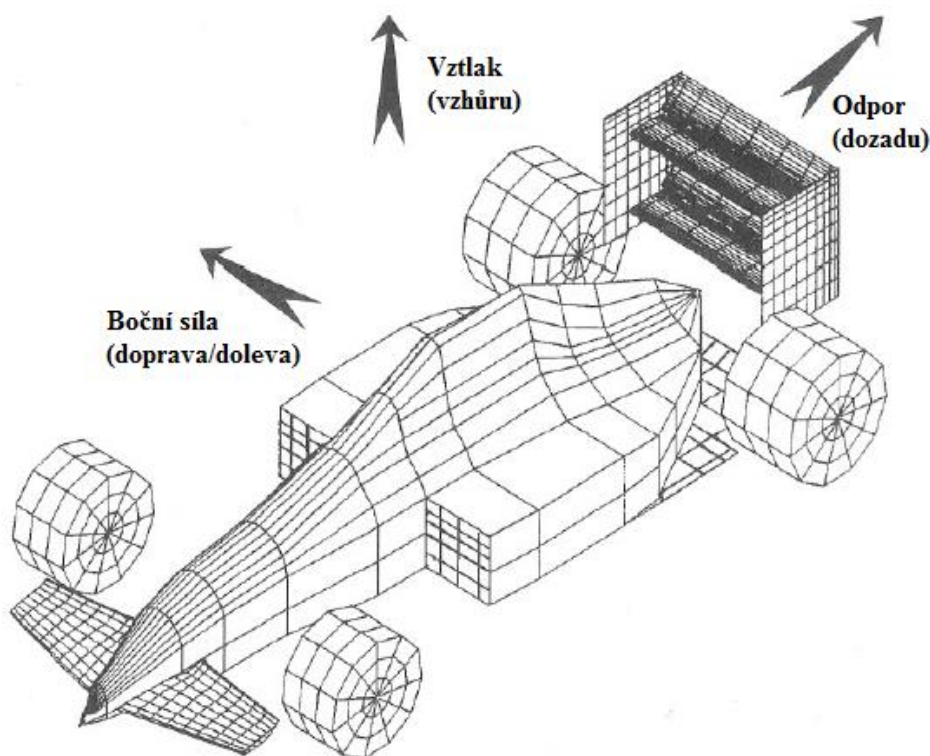
Pod pojmem boční síla lze chápat náhlá změna proudění vzduchu na bok vozu. Jedná se především o vítr, který během závodění na vůz působí, anebo se může jednat o změnu tlaku vzduchu při objíždění nějakého tělesa. Rychlost vozu však často bývá mnohem vyšší než rychlost větru, a proto při návrhu vozu nebývá kladen příliš vysoký důraz na tuto sílu.

Závodní vozy se navrhují s co nejmenším odporem vzduchu a také s vysokým přitlakem. Pro dosažení zkrácené doby strávené na trati, je zvýšení rychlosti průjezdu zatáčkami nutností. Snížení odporu vzduchu sice vozidlu dovolí vyvinout vyšší rychlost při nájezdu do zatáčky, ale



při samotném průjezdu už přilnavost vozu ovlivňuje minimálně. Navýšení přítláčné síly však zvýší přilnavost pneumatik s vozovkou, a proto vůz nesklouzne ven ze silnice ani při vysokých rychlostech. Samozřejmě, že existuje hranice rychlosti průjezdu zatáčkou, za kterou u daného vozu dojde k ztrátě přilnavosti.

Působení aerodynamických sil je mimo těžiště vozu a směry jednotlivých komponent jsou uvedeny na obr. 3. Vytvoření přítláčné síly pomocí podvozku vozu je uvedeno v další kapitole.



Obr. 3 Směry tří komponent aerodynamických sil [3]

1.3 VLASTNOSTI TEKUTIN

Vozidlo se pohybuje ve vzdušném prostředí, proto se chování vzduchu musí určitým způsobem popsat. Vzduch chápeme jako fluidní materiál.

1.3.1 VISKOZITA TEKUTIN

Viskozita v tekutinách udává poměr mezi tečným napětím τ a změnou rychlosti V v závislosti na vzdálenosti h mezi sousedními vrstvami. Vychází z definice pro tečné napětí, kde F představuje působící sílu a S plochu. Obr. 4 ukazuje tekutinu umístěnou mezi dvě pevné povrchy. Spodní povrch je stacionární, zatímco horní se pohybuje doprava s konstantní rychlostí. Látka, vyplňující prostor mezi deskami má tendence přilnout k povrchu a těsně nad povrchem desky má stejnou rychlost jako deska samotná. Médium v blízkosti spodní desky má

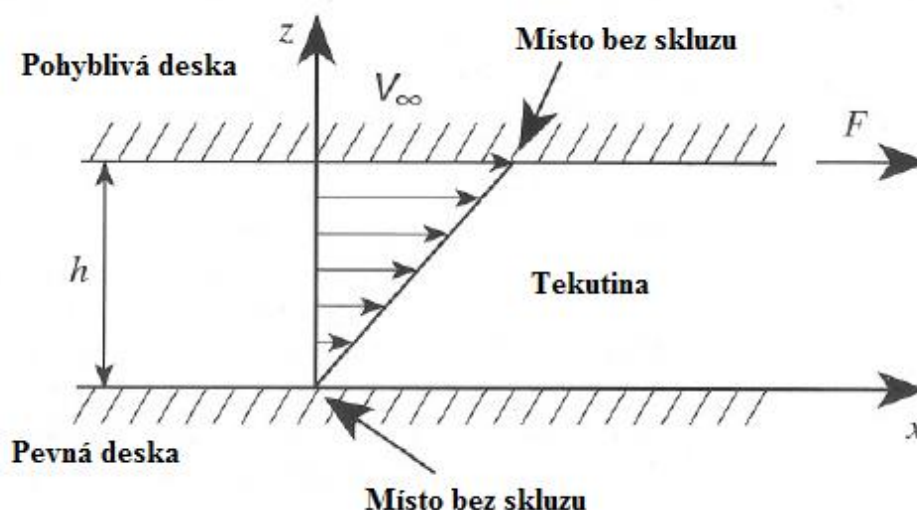


tedy relativní velikost rychlosti nulovou. V průběhu pohybu horní desky se tekutina rovněž rozpohybuje. Viskozita je popsána rovnicí 2 [3] a vychází z rovnice 1 pro tečné napětí [3].

Jedná se o odpor, kdy tekutina působí proti silám, které se snaží posunout její nejmenší částice mezi dvěma plochami s různou rychlostí posunu. U posunu mezi jednotlivými částicemi dochází ke tření, které zpomaluje pohyb jednotlivých vrstev tekutiny. Bude-li v prostoru mezi deskami tekutina s nižší viskozitou, budou se desky pohybovat s menšími obtížemi, než při použití tekutiny s vyšší viskozitou.

$$\tau = \frac{F}{S} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\tau h}{V} \quad (2)$$



Obr. 4 Viskozita kapaliny mezi dvěma deskami, spodní je stacionární a horní se pohybuje [3]

1.3.2 LAMINÁRNÍ A TURBULENTNÍ PROUDĚNÍ

Jedná se o proudění skutečné kapaliny, která má nenulovou viskozitu a je stlačitelná. Jsou-li proudnice kapaliny rovnoběžné a částice se pohybují vedle sebe a nemísí se navzájem, jedná se o proudění laminární. O tom už vypovídá i samotné latinské slovo lamina, což v překladu znamená destička. Jsou-li však proudnice kapaliny navzájem promíchané a částice se pohybují různými směry, jedná se o proudění turbulentní. Opět název vznikl z latinského slova turbo, což v překladu znamená bouřit.



1.3.3 REYNOLDSOVO ČÍSLO

Reynoldsovo číslo (zkráceně Re) je pojmenovaného podle významného britského vědce, Osborna Reynoldse. Re udává odpor prostředí vytvořený prouděním tekutiny v důsledku tření na povrchu zkoumaného tělesa. Jedná se o srovnávací kritérium, poměr setrvačné a třecí síly, určující charakter proudění. Podle velikosti lze určit, zda se jedná o proudění laminární nebo turbulentní. Platí, že s rostoucím Re je vyšší i výsledný, měřený odpor prostředí. Vztah je uveden rov. 3 [3], kde V je rychlost, L představuje délku, viskozitu zastupuje μ a ρ je hustota kapaliny.

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (3)$$

Význam Reynoldsova čísla je veliký a v praxi složí pro zkoumání odporové síly při obtékání tělesa. Také pomocí něj lze provádět experimentální pokusy ve větrných tunelech při použití zmenšených modelů vozů nebo jednotlivých prvků. Hodnoty naměřené u zmenšených modelů se budou rovnat hodnotám skutečného modelu za předpokladu stejného Re . Podvozek vozu je rozsáhlý prvek, a proto jeho minimalizace do modelu, šetří náklady větrného tunelu potřebné k jeho výzkumu a optimalizaci. U podvozku vozu se zkoumá jeho drsnost a snahou je o jeho hladkost, kvůli kterému dojde k nižšímu tření.

1.3.4 PROUDNICE

Proudnicí lze chápat, jako malou částčku, vloženou do určitého bodu před vozidlem, která je následně unášena ve směru proudícího vzduchu. Pokud vzduch neobtéká žádné těleso, ani částčka nemá tendenci se ubírat jiným směrem. Malá částčka se pohybuje po křivce, která se jmenuje trajektorie. Proudnice má tečný směr vektorů rychlostí a tvoří obálku těchto vektorů. Výsledný obraz obtékaného vozidla vzniká vizualizací těchto proudnic, jako je vyznačeno na obr. 5.



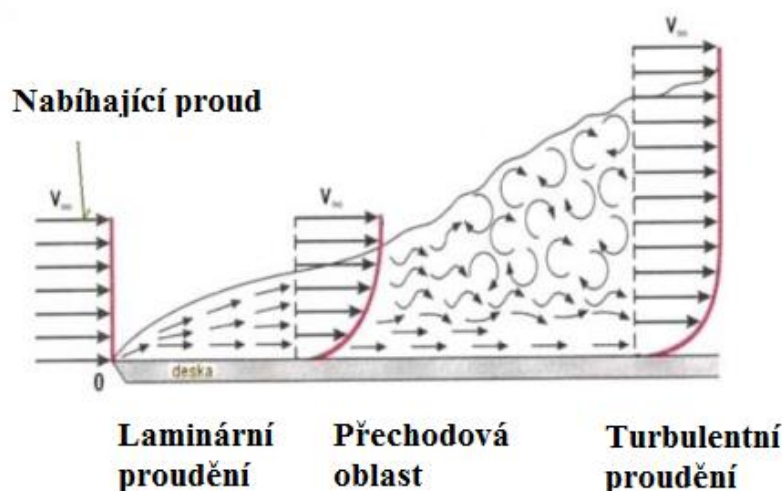
Obr. 5 Proudnice obtékající okolo sportovního automobilu [4]



Slouží k vizualizaci obtékání vzduchu okolo vozidla. Díky nim lze určit především směr působení vzduchu u jednotlivých aerodynamických prvků a navrhnout tak jejich optimální tvar při jejich konstrukci.

1.4 MEZNÍ VRSTVA

Mezní vrstva se tvoří těsně nad povrchem tělesa při obtékání tekutinou. Je způsobena třením v blízkosti povrchu, kde se proud zpomaluje a na samotném povrchu tělesa má tekutina nulovou rychlost. Je to vrstva v úplné blízkosti obtékaného tělesa. Charakter průběhu rychlosti částice vzdalující se od povrchu tělesa je na obr. 6.



Obr. 6 Průběh mezní vrstvy během obtékání okolo stacionární plochy [5]

Mezní vrstva může být laminární nebo turbulentní nebo často může pozvolna přejít z laminárního stavu právě do turbulentního. Jakmile vzroste odpovídající hodnota Re , proud začne měnit své chování a při mezní hodnotě $Re = 2320$ se změní na turbulentní. Oblast, kde k této přeměně dochází, se nazývá přechodová oblast. Díky změně složky turbulentní rychlosti je mezní vrstva širší a dochází zde k nárůstu konečného odporu vzduchu. U reálných těles dochází i k odtržení mezní vrstvy a to v závislosti na rychlosti, na drsnosti, na turbulenci proudu a na tlakovém gradientu. Odtržení mezní vrstvy, znamená nárůst odporu prostředí. U turbulentního proudění v mezní vrstvě dojde k odtržení později.

1.5 BERNOLLIHO ROVNICE

Bernolliho rovnice popisuje princip proudění tekutiny, za předpokladu zákona zachování energie pro ustálené proudění. Popisuje souvislost mezi rychlostí vzduchu a tlakem a pomocí této rovnice lze popsat chování vzduchu při obtékání tělesa nebo mezi dvěma plochami.

Vztah odvodil Daniel Bernoulli, matematik žijící v období 1700-1782. Tato rovnice konstatuje, že při změně rychlosti proudu vzduchu okolo tělesa, se tlak mění také, ale v převráceném



poměru než je změna rychlosti vzduchu. Volněji řečeno, při rychlejším proudění vzduchu okolo tělesa, se bude tlak snižovat. Algebraická formulace Bernoulliho rovnice je uvedena rovnicí 4 [3].

$$\frac{P}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{Konstanta} \quad (4)$$

Kde P představuje tlak, ρ hustotu tekutiny a V rychlost proudění, g tíhové zrychlení a z výšku hladiny v určitém místě na proudnici. První člen rovnice představuje dynamickou složku (kinetická energie) a druhý člen rovnice představuje složku statickou (potenciální tlaková energie). Člen třetí představuje potenciální (tíhovou) energii, která je v tomto případě nulová. Obě složky se musejí rovnat konstantě.

Z rovnice vyplývá, že pokud se rychlost proudu tekutiny zvýší, zapříčiní pokles tlaku ve stejném místě. Vzduch je chápán jako tekutina. Pokud se automobil pohybuje, jak už bylo řečeno, působí na něj vzduchem vytvořené zatížení. Zatížení se rozděluje do dvou částí, kde první představuje smykovou sílu, nebo-li povrchové tření, v místě působení proudu vzduchu, která vzniká kvůli viskózní mezní vrstvě a projevuje se především odporem. Druhá složka síly se vytváří kvůli změně tlaku v jednotlivých místech a projevuje se vztlakem i odporem vzduchu. Její měř působíště je kolmý na povrch. Zajímavostí je, že tlaková síla je zapříčiněna převážně rychlostí a přítlačná síla je doprovázena změnou jednotlivých tlaků mimo mezní vrstvu. Tato složka síly vychází z Newtonova zákona akce a reakce. Obě zatížení závisí na rychlosti blízko povrchu vozidla a jsou výsledkem různých zakřivení karoserie.

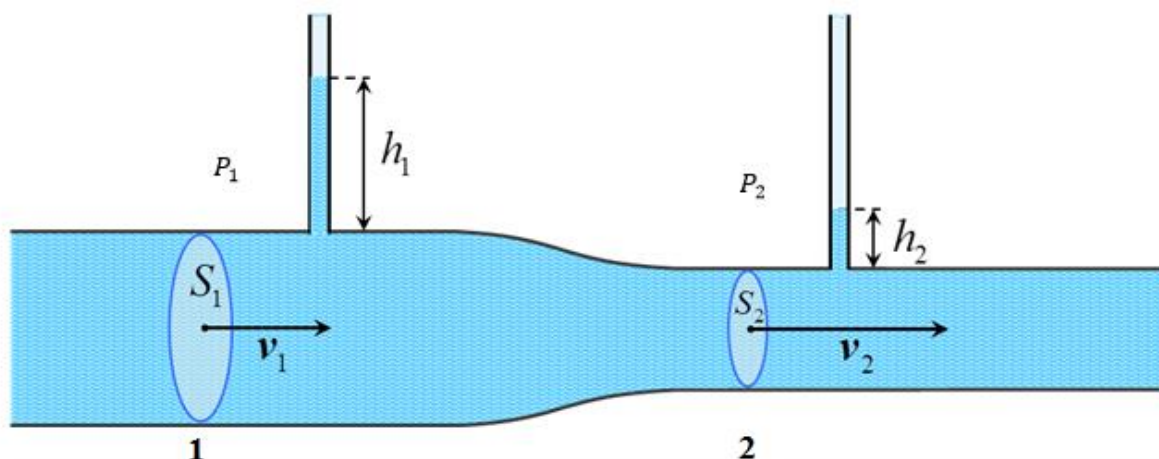
Rovnice se používá v příkladech, kde se uvedou do rovnosti dva body u obtékaného tělesa. Body musí být umístěné na stejné proudnici. Bernoulliho rovnicí lze popsat chování vzduchu při prouděním pod podvozkem vozidla a využívá se při výpočtech změn tlaků.

1.6 VENTURIHO TRUBICE

Zařízení pro měření proudění kapalin se nazývá Venturiho trubice. Zařízení je pojmenováno podle italského fyzika G. B. Venturiho (1746-1822) a je podle něj pojmenován například karburátor nebo tunely v podlaze závodních vozů.

Venturiho měřidlo se skládá z trubice, která je uprostřed zúžená, jako je na obr. 7. Jedná se o přímou aplikaci Bernoulliho rovnice. V oblasti plochy S_1 je rychlost V_1 a tekutina obsahuje kinetickou energii. Jakmile se prostor zúží na plochu o průřezu S_2 , rychlost V_2 se musí navýšit a aby platil zákon zachování energie, musí se jedna složka změnit na úkor složky druhé. V tomto případě tedy v místě 2 vzroste rychlost proudu, ale klesne jeho tlak a změní se kinetická energie na úkor potenciální tlakové energie. Vzduch proudí v užší části rychleji, což vyplývá i z kontinuity rov. 5. [6]

Měření rozdílu tlaku se provádí pomocí tenké trubice, která je částečně naplněna kapalinou s rozdílnou hustotou a spojuje dvě části, jak širší tak i zúžené místo trubice. Tlakový rozdíl mezi jednotlivými sekcemi Venturiho trubice způsobí růst kapaliny do určité výšky v tenké trubici, ze které se pomocí výpočtu potenciální změny hladiny kapaliny dokáže vypočítat rozdílný tlak uvnitř Venturiovy trubice.



Obr. 7 Venturiho trubice pro výpočet změn tlaků [7]

$$V_1 S_1 = V_2 S_2 \quad (5)$$

V uvedené rovnici V představuje rychlost a S průřez dané plochy, koeficienty 1 a 2 znázorňují danou sekci trubice. Z dříve vyjasněných předpokladů a dosazení do Bernoulliho rovnice, pak po matematických úpravách a substituci se získá vztah pro rychlost v bodě 1, rov. 6. [6]. Zde P představuje tlak a hustotu značíme ρ . Z vypočtené rychlosti pak dokážeme vypočítat rozdíl tlaků v zúženém místě, pokud to situace vyžaduje.

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[\left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 - 1 \right]}} \quad (6)$$

1.7 TLAKOVÝ KOEFICIENT

Pro měření aerodynamického zatížení je nezbytnou součástí znát tlak vyvolaný na povrchu tělesa. V praxi se toto měření provádí vyvrtáním malých děr do karoserie vozu, v našem případě do podvozku vozu, pro naměření jednotlivých lokálních tlaků. Následnou integrací těchto tlaků se vypočte výsledná vztlaková síla. Měření tlakových rozdílů v různých místech je experimentálně jednodušší, než měření rychlosti proudění.

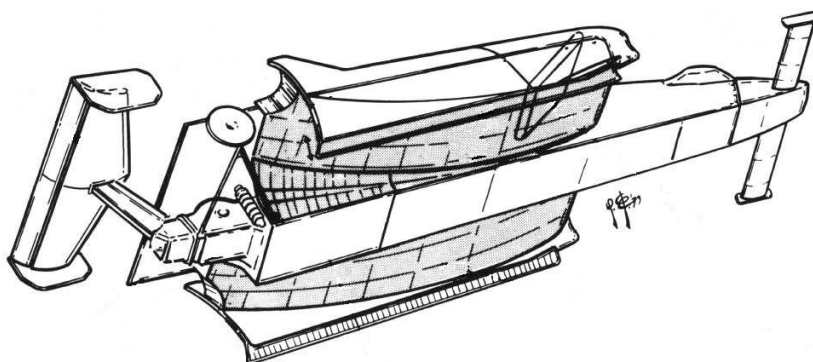
Tlakový koeficient C_p slouží k přepočtu rozdílů, kdy se rozdílnost tlaků dává do poměru s dynamickým tlakem, což uvádí rovnice. Je to bezrozměrná veličina a e snaze ponechat koeficient nezávislý na rychlosti je podělen dynamickým tlakem. Rovnice pro C_p vypadá následovně [3]:

$$C_p = \frac{P - P_\infty}{\left(\frac{1}{2} \right) \rho V^2} \quad (7)$$



1.7.1 TLAKOVÝ PRŮBĚH OKOLO TVAROVÉHO TĚLESA

Při využití již zmíněných znalostí, si lze vysvětlit průběh změny tlaku při obtékání daného tělesa. Obtéká-li proud okolo povrchu, který má konkávní tvar, pak rychlost klesá a tlak vzrůstá. Na druhou stranu, pokud proud obtéká okolo povrchu, který má konvexní tvar, rychlost narůstá a naopak tlak klesá. Využití konkávního tvaru si lze povšimnout na obr. 8, kde je ukázán podvozek formule. Začátek a stejně tak i vyústění Venturiho tunelů má právě konkávní tvar, což má za příčinu snížení tlaků, respektive navýšení rychlosti proudu a vyvolání přtlaku. Nedochází zde k odtržení mezní vrstvy, a proto je odpor vzduchu minimální.



Obr. 8 Podvozek formule, znázornění konkávního tvaru sklonu ploch tunelů [8]

Zjištění rozdělení tlaků v jednotlivých částech automobilu je velmi důležité, protože díky nim, lze lépe navrhnout například chladicí vtokové soustavy nebo naopak jejich vyústění. Také napomáhají vhodně navrhnout tvar a sklon podlahy nebo dokonce tvar Venturiho tunelů.

Rozeznávají se dva typy rozdělení tlaků, příznivý (kladný gradient) a nepříznivý (záporný gradient). Přičemž u příznivého rozdělení tlaků klesá tlak podél proudnice, ale u nepříznivého rozdělení tlaků, tlak podél proudnice vzrůstá. Při příznivém tlakovém gradientu proudění zůstává déle napojené k povrchu obtékaného tělesa a mezní vrstva při tomto typu proudění zůstane na větší vzdálenosti povrchu laminární. Tohle vše má za následek menší povrchové tření a tedy menší odpor vzduchu. Pro vhodné navržení podvozku vozu je tedy potřeba dbát pro zajištění kladného gradientu tlaku a dosáhnout konkávního tvaru podvozku.

1.8 URČENÍ KOEFICIENTŮ AERODYNAMICKÝCH SIL

Před přikročení k následujícímu tématu, jsou zde uvedeny další často používané koeficienty uváděné v literatuře. Koeficienty dávají do vztahu základní síly, jako je odpor vzduchu, vztlačová síla nebo boční síla, s tvarem obtékaného tělesa a s proudícím vzduchem. Jedná se o experimentální veličiny. Jednotlivé vztahy koeficientů jsou uvedeny v rovnicích 8, 9 10 [3].



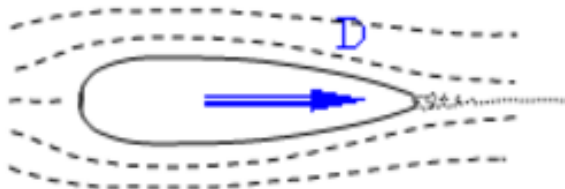
$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 S} \quad (8)$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 S} \quad (9)$$

$$C_Y = \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 S} \quad (10)$$

Jednotlivé členy představují D sílu odporu vzduchu (z angl. drag), L (z angl. lift) vztlakovou sílu a Y představuje boční sílu. Tyto síly jsou vždy vyděleny dynamickým tlakem a obsahem dané plochy S . U závodních aplikací je přední plocha vozidla často chápána jako celková hlavní plocha, která naráží proti proudu vzduchu a je dosazována do rovnice. V Evropě jsou koeficienty často uváděny s indexy jednotlivých směrů. V tom případě nahrazují C_x , C_y , C_z postupně jednotlivé koeficienty C_D , C_Y a C_L .

Pro snadnější pochopení jednotlivých koeficientů jsou zde uvedeny dva příklady. V prvním případě, obr. 9 se jedná o aerodynamický tvar tělesa. Zde hodnota koeficientu odporu C_d činí hodnotu velice malou, $C_d = 0,04$. Jedná se o odpor způsobený především třením vzduchu o povrch tělesa. Vztlak v tomto případě je nulový. V druhé je na obr. 11 prototypový okruhový speciál, který obsahuje mnoho aerodynamických prvků. Přibližná hodnota koeficientu odporu je $C_d = 0,75$ a hodnota koeficientu vztlaku se pohybuje okolo čísla $C_l = -3$. Znaménko mínus tedy značí hodnotu koeficientu přitlaku rovnou třem. Hodnoty jednotlivých koeficientů jsou měřeny při stejných podmínkách. [3]



Obr. 9 Aerodynamický tvar tělesa [9]



Obr. 10 Aerodynamický tvar prototypového vozu Cadillac Northstar LeMans z roku 2002 [10]



2 PŘÍSAVNÝ EFEKT

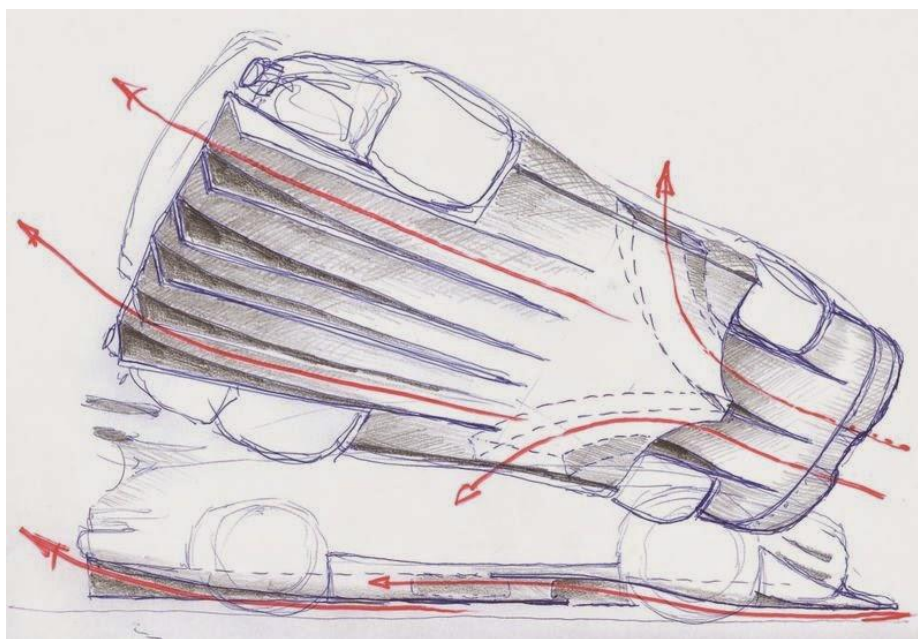
V motorsportu se pro zvýšení přítláčné síly vozidla využívá mnoho různých způsobů. Ty často souvisejí s vhodným navržením samotného aerodynamického tvaru jednotlivých dílů. Tato kapitola se bude věnovat přísavnému efektu, který úzce souvisí s podvozkem vozidla, respektive s jeho tvarem a polohou.

2.1 DEFINICE PŘÍSAVNÉHO EFEKTU

Pod pojmem přísavný efekt (v angl. Ground effect) se rozumí situace, kdy dochází během jízdy k poklesu tlaku vzduchu pod závodním automobilem. Ten se pohybuje po silnici a část vozidla (podlaha), která je v blízkosti vozovky, je přisávána právě v důsledku podtlaku. Tento jev je následkem změny průřezu oblasti, kde prochází proud vzduchu a jeho rychlost se zvyšuje a tlak naopak snižuje. Jde tedy konstatovat, že tímto jevem se vytváří přítlak, a také, že se zde v praxi aplikuje určitý typ Venturiho trubice.

K aerodynamické účinnosti vozidla přispívají nejvíce části (převážně podlaha vozu), které jsou umístěny v blízkosti působení přísavného efektu. Tyto části způsobují nižší odpor vzduchu vůči prostředí v porovnání s přítlácnými křídly nebo jinými aerodynamickými prvky. Mezi tyto prvky působící v blízkosti vozovky řadíme přední přítláčné křídlo nebo přední nárazník, samotnou podlahu vozu, boční prahy, difuzory a také se zde musí započítat i vliv pneumatik. Zadní přítláčné křídlo, samotný tvar vozidla nebo další prvky se přímo nepodílí na vytváření přítlaku přísavným efektem, ale často jejich poloha napomáhá tomuto jevu. Protože jsou všechny aerodynamické prvky umístěny na jednom vozidle, navzájem se ovlivňují, a proto musí být jejich vzájemné vazby brány v úvahu.

Na obr. 11, je vyobrazen také podvozek vozu, ale DTM série. Jedná se o vůz, kde se využívá přítláčné síly vyvolané pomocí tunelů i v přední části vozu. V zadní části vozu je místo kde se průřez plochy pod podvozkem rozšiřuje a vzniká zde podtlak, který roste s rozšiřující vzdáleností. Vzduch zepředu a také z boku vchází pod spodní část vozu, kde je následně urychlován tunely. Podtlak vytvořený u přední nápravy vychází průduchy ven z boku vozu a část proudu pod podvozkem pokračuje k zadním tunelům, kde opět stoupající sklon ploch podvozku vytváří tlak s nižší hodnotou. Směr toku vzduchu je znázorněn šipkami červené barvy.



Obr. 11 Skica podvozku vozu GT, využití tunelů pro pokles tlaku i v přední části vozu [11]

Vytvoření přísavného efektu spočívá i v tom, že při aplikaci velké a rovné plochy podlahy vozu lze dosáhnout poměrně vysokého přitlaku. Nemusí se tedy nutně jednat o podobné tunelové systémy, nicméně vhodný tvar podlahy přitlak jen zvyšuje. Využití tohoto efektu je velice přínosné, a proto nachází využití v mnoha typech závodění a to i z důvodů, že během vytvoření přísavného efektu, je nárůst odporu vzduchu dosti malý.

2.2 HISTORIE PŘÍSAVNÉHO EFEKTU

Přísavný efekt byl poprvé použitý u vozu značky Chaparral roku 1970, která obsahovala dva ventilátory v zadní části monopostu, které odsávaly vzduch z prostoru pod podvozkem. Jednalo se ohromující převrat ve vývoji přitlačné síly a za zrodem této teorie stojí americký konstruktér Jim Hall. Ventilátory poháněl samostatný motor a o vysoký přitlak se staraly i aktivní těsnící bočnice. Vůz však měl mnoho technických problémů a po čase byly aktivní aerodynamické prvky zakázány.

V šampionátu formule 1 přišel s myšlenkou vytvoření velmi vysokého přitlaku vytvořeným podlahovými tunely inženýr Colin Chapman. Také jej napadla myšlenka využít vozovku s monopostem jako aerodynamický prvek pro vytvoření přitlaku. V roce 1977 vyvinuli inženýři stále Lotus monopost pod názvem Lotus 78 a svůj premiérový start si odbyl na Argentinské Grand Prix téhož roku. Nicméně díky spoustě technických závad tento vůz pilotovaný jezdcem Mario Andreottim sezonu nedokončil na nejlepším místě.

Pro další sezonu tým vyvinul nový monopost pod názvem Lotus 79, který obsahoval upravené zadní přitlačné křídlo, nový celkový tvar karoserie a nespočet dalších vylepšení. Pilot Anderetti dokázal s tímto vozem vyhrát 7 závodů a v konečném zúčtování celý tým Lotus vyhrál pohár konstruktérů pro rok 1978. Tento úspěch se však krčil ve stínu velké tragédie, když jezdec



Ronnie Peterson, pilotující formuli Lotus 78, tragicky zahynul při nehodě na okruhu v Itálii. [16]

V roce 1978 se však do přímého souboje o titul vrhl i tým Brabham, když konstruktér Gordon Murray s týmem vyvinul formuli Brabham BT46B. Ten využil také přísavného efektu, avšak podobnému použitého u Chaparralu. Do zadní části formule se opět připevnil výkonný větrák, který odsával vzduch ze spodní části podvozku ohraničené těsníci prvky, ale jednalo se o aktivní ventilátor, který nebyl primárně určen k vytvoření silného podtlaku, ale k zvýšení odvádění vzduchu od chladičů. Nicméně koncem 70. let vyšlo nařízení zakazující použití aktivních aerodynamických prvků a i Brabham, byť dle názoru Gordona Murraye neprávem, ukončil vývoj.

Podvozek formulí 1 musel mít podle přepisů plochý tvar a nesměl obsahovat velké difuzory. Vše však vycházelo z opodstatněných faktů. Vždyť časy na jednotlivých okruzích se často zlepšily až o 6s na jedno kolo oproti předchozímu roku na stejné trati. Také rychlosti v průjezdech jednotlivých zatáček znatelně vzrostly a monoposty s piloty projížděly zatáčky v takové rychlosti, že hrozila krátkodobá ztráta vědomí. Navíc okruhy v tehdejší době nebyly připravené na takto rychle vozy. Pokud se započítají i nedokonalosti přísavného efektu, je jasné, že se jednalo o bezpečnostní nařízení. O narušení přítlaku vyvolaným přísavným efektem bude zmínka ještě později.

V dalších letech závodění F1 byly podlahové tunely zakázány nebo omezeny a využívalo se přísavné síly vyvolané vhodnou výškou polohy a náklonem podvozku. U monopostu F1 je povolen jen malý zadní difuzor.

Venturiho tunely, či jiná sofistikovaná aerodynamická zařízení pro vyvolání podtlaku pod vozidlem, se využívaly a dodnes využívají u jiných typů závodních vozů. Například u prototypových automobilů v sérii LeMans, vozů série DTM nebo u formulí pro šampionát Indy car. V současné době FIA zvažuje vydání nového nařízení a diskutuje se o znovu zavedení určité, bezpečné formě zvětšených zadních difuzorů i pro formule 1. Zda se techničtí inženýři jednotlivých týmů dohodnou s automobilovou federací, je zatím otázkou budoucnosti.

Fotodokumentace jednotlivých uvedených vozů bude v třetí kapitole této práce.

2.3 VÝZNAM PŘÍSAVNÉHO EFEKTU

V tomto smyslu vznikl velice ojedinělý a chytrý úkaz, kdy si je třeba uvědomit, že silnice, po které se vozidlo pohybuje, je součástí aerodynamiky vozu. Vozovku lze tedy chápat jako část nebo plochu, která ohraničuje prostor proudu vzduchu, a protože je silnice plochá, může se podlaha vozu navrhout a tvarovat tak, že při určité rychlosti se zde vytvoří onen zmiňovaný podtlak. Tento efekt tedy lze také definovat, že pro vytvoření přítlaku musíme využít zem jako aerodynamický prvek. Opět se zde potvrzuje pravidlo, že aerodynamika musí být chápána jako celek.

Vliv blízkosti povrchu na pohybující se aerodynamické těleso byl už dříve vypořádán v leteckém průmyslu. Zde si povšimli, že při přeletu letadla těsně nad povrchem země nebo moře dochází k velkému vztlaku na křídlech letadla a úbytku odporu vzduchu. Tento jev byl později využit u závodních vozů, samozřejmě s opačným sklonem křídel, než tomu je u letadel.



2.4 JEDNOTLIVÉ FAKTORY PŘÍSAVNÉHO EFEKTU

Všechny automobily, už podle definice, fungují s přísavným efektem. To znamená, že u všech bude určitý zásah proudění vzduchu pod vozidlem, který následně ovlivňuje proudění nad karoserií vozu, vedle a také okolo celku. To však závisí na tvaru charakteru podlahy a efekt může být přínosný nebo nežádoucí.

Typický osobní automobil má podlahu dosti členitou a tvoří ji součásti jako například výfukový systém, odpružení, převodovka, jednotlivé nápravy a palivová nádrž, které vyčnívají do prostoru pod vozidlem a vytvářejí tam vzduchové dutiny. Tam se tvoří silná mezní vrstva a vzniká zde proud vzduchu, který má obecně turbulentní charakter i nižší rychlost a v zadní části se spojí s vytvořenými víry. U osobních automobilů na tento fakt není kladen až takový důraz, ale u závodních vozů je snaha o pokles lokálního tlaku pod podvozkem co nejvíce zvýšit.

Prvky, které se přímo podílejí na žádoucím efektu:

- Světlá výška podvozku
- „Drsnost“ samotné podlahy vozu
- Navržení vhodného tvaru podvozku
- Utvařeče vírů

Je potřeba si také uvědomit, že jednotlivé prvky se navzájem ovlivňují. Jinak řečeno, pokud na spodní části podlahy vozu vyčnívá množství součástí, pak jedna z možných metod pro snížení statického tlaku, je zvýšení světlé výšky podvozku vozidla. Nerovnosti na podvozku vytvářejí pozitivní vztlak a také zvyšují odpor vzduchu, a proto jsou v motorsportu spíše nežádoucí.

Aerodynamické prvky, které ovlivňují přísavný efekt:

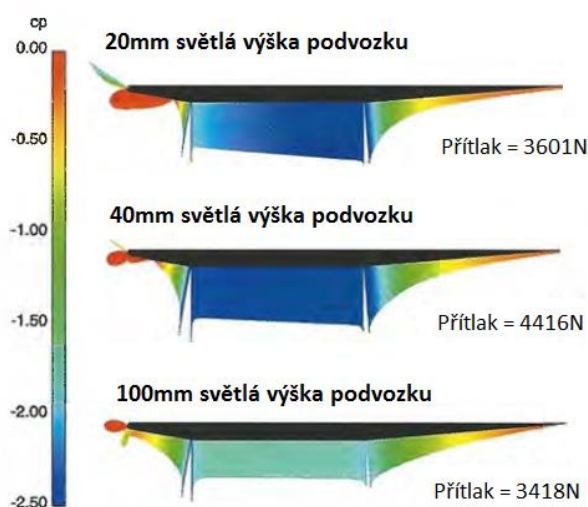
- Přední část vozu (křídlo či spoiler)
- Točící se kola vozidla

2.4.1 SVĚTLÁ VÝŠKA A NÁKLON PODVOZKU

Výška těžiště závodního vozu je velice důležitá, protože platí, že čím níže se samotné těžiště nachází, tím vyšší stability vozu lze dosáhnout. Také byl dříve zmíněn fakt, že při pohybu křídla v blízkosti země vzrůstá výsledný vztlak. Podvozek automobilu lze připodobnit k tomuto úkazu. Vzdálenost podvozku od země se značí symbolem h (v angl. ground clearance) a délka plochy podvozku L . Při poměru těchto hodnot vznikne poměrové číslo. U osobních automobilů je toto číslo vyšší, než u závodních vozů. Tento fakt vychází jedna z necelistvosti podvozku u osobních automobilů a taky z jejich vysoké výšky a špatném úhlu náklonu. Všechny tyto tři poznatky se navzájem ovlivňují.

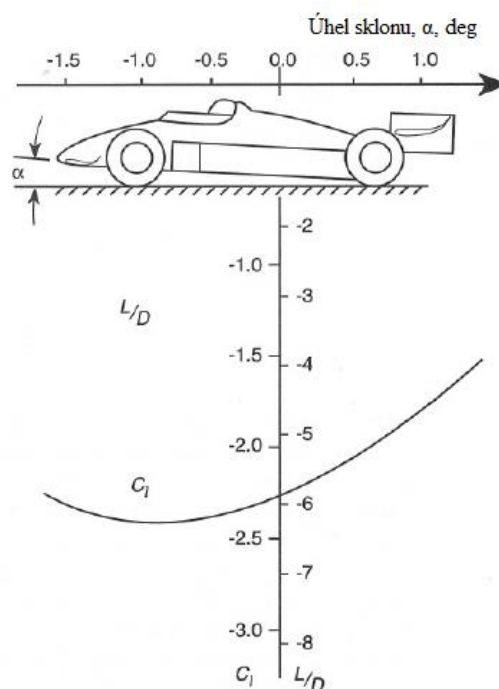
Samotné lokální tlaky pod podvozkem se vypočítají pomocí Bernoulliho rovnice, ze kterých se následně dopočítá vytvořený přítlak. Na obr. 12 jsou ukázány 3 výškové situace v závislosti na koeficientu tlaku C_p . Znázorněná deska zde představuje profil podvozku vozu a v její přední

části se nachází konfuzor s úhlem náběhu 10° , v zadní části zase difusor se sklonem 5° . Funkci difusoru bude objasněna později v této kapitole. U příkladu s výškou 100 mm tvoří pokles tlaku rovnoměrný úbytek, snížený nízkým statickým tlakem podél krčku (plochá sekce). Při výšce 40 mm je významný statický tlak získán v ploché části a je zde také nejnižší odpor prostředí. Při této poloze podvozku se získá nejvyšší přítlak. V případě s 20mm proud vzduchu stabilně zrychluje v místech krčku a hodnota talkového koeficientu je stejná jako u výšky 40mm, ale pouze v zadní části. V prostřední sekci je silný úbytek tlaku, a proto zde celkový přítlak není tak vysoký. V oblasti náběhu tvaru tělesa, se kvůli viskózní neprůchodnosti vytvoří blok vzduchu, který sníží tlak v místě za ním, což snižuje celkovou využitelnou účinnost tohoto jevu. [12]



Obr. 12 Hodnoty koeficientu tlaku v závislosti na světlé výšce [12]

Velice důležitým faktorem u přísavného efektu je náklon podvozku. Ten ovlivňuje jak míru přítlaku C_L , tak i odpor prostředí C_D . U vozidla se značí úhel mezi zemí a podvozkem symbolem α . Při menší světlé výšce a náklonu méně než -1° vzniká v přední části vlivem viskozity snížení průchodnosti proudu vzduchu, což má za následek zastavení zvyšování úbytku tlaku ve spodní části vozu. Proto zde existuje hranice, od které je snižování náklonu vozu nežádoucí. V extrémních případech může dojít až ke kontaktu přední části vozu s povrchem vozovky. Obr. 13 znázorňuje závislost koeficientu vztlaku na úhlu α a poměru výšky a délky podvozku. Optimální náklon vozu se je okolo -1° [3].



Obr. 13 Znáznornění průběhu koeficientu vztlaku na úhlu náklonu vozu [3]

Pro úplnost je zde reálný příklad formule 1 na obr. 14, kde sice úhel není zaznačen, ale při důkladnějším prohlédnutí je jasně zřetelný náklon spodní strany podlahy monopostu. Vždy je potřeba mít na paměti, že při hledání vhodné výšky podvozku a sklonu se musí udělat určitá idealizace jednotlivých efektů a nalézt tak vhodnou polohu a vhodné nastavení vozu pro maximální možný přítlak.



Obr. 14 Ferrari SF16-H Launch a jeho náklon podvozku [13]



2.4.2 „DRSNOST“ PODLAHY

Pod tímto pojmem si lze vysvětlit mnohé, ale autor této práce má na mysli nejednotnost, složitost a necelistvost spodní části podvozku. To znázorňuje obr. 15, kde je ukázán sportovní vůz značky Chevrolet z roku 2015. Proud vzduchu pod automobilem brání v hladkém průchodu množství vyčnívajících součástí a také zde vznikají vzduchové kapsy, kolem kterých se tvoří víry. Kvůli zakřivení výčnělek a jejich drsnému povrchu má samotné obtékání proudů vzduchu za následek vyšší odpor prostředí.



Obr. 15 Podvozek obsahující mnoho vyčnívajících součástí, Chevrolet Corvette Z06 [14]

Proto se spodní části podlahy často vyrábějí z jednoho dílu, který má hladký povrch, neobsahuje žádné výčnělky a jednotlivé tvarování podléhá základním pravidlům aerodynamiky. Tato část vozidla je rovněž vyrobena z lehkého materiálu, aby příliš nezvyšovala celkovou váhu vozu. Pro inspiraci, jak takový díl vypadá, je zde uveden obr. 16 a jedná se o podvozek formule 1.

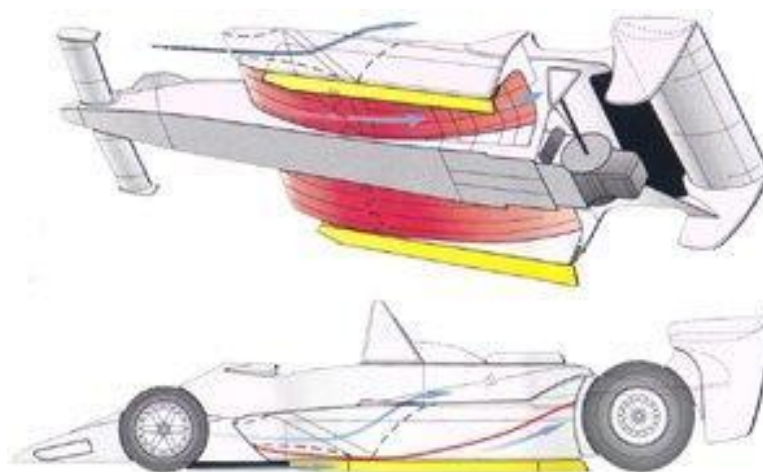


Obr. 16 Celistvý a hladký podvozek monopostu F1 [15]

2.4.3 NAVRŽENÍ VHODNÉHO TVARU PODVOZKU

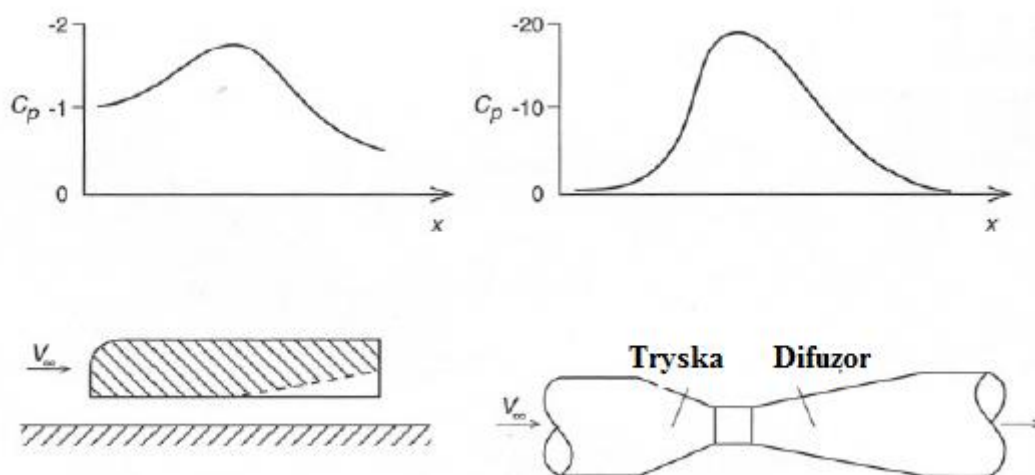
Přítlak se dokáže zvýšit při průchodu proudění sofistikovaným navržením tvaru podlahy vozu při relativně malém nárůstu odporu vzduchu. Jedná se zde také o určitý kompromis mezi příznivou světlou výškou podvozků, rozložením těžkých součástí do nejnižší možné polohy vozu a optimálním tvarem podlahy. Vše často bývá velmi limitováno pravidly pro závodění.

V této podkapitole se budu věnovat Venturiho tunelům, v jiné literatuře uváděných i jako podlahové tunely či kanály nebo difuzory. Jsou to tedy jakési stoupající plochy vzhledem k ploše podvozků, které jsou ohraničeny na bocích rovnými plochami. Na obr. 17 je vyobrazen podvozek formule Lotus s typickým tvarem tunelů. Vzduch se do kanálů dostává z přední a boční strany vozidla a vytváří se soustředné víry. Jednotlivé víry mohou stabilizovat proudění. Snahou je vyhnout se ostře navrženým rohům kvůli zvýšení intenzity valení vírů. Tvar samotného náběhu tunelů by měl mít konkávní tvar.



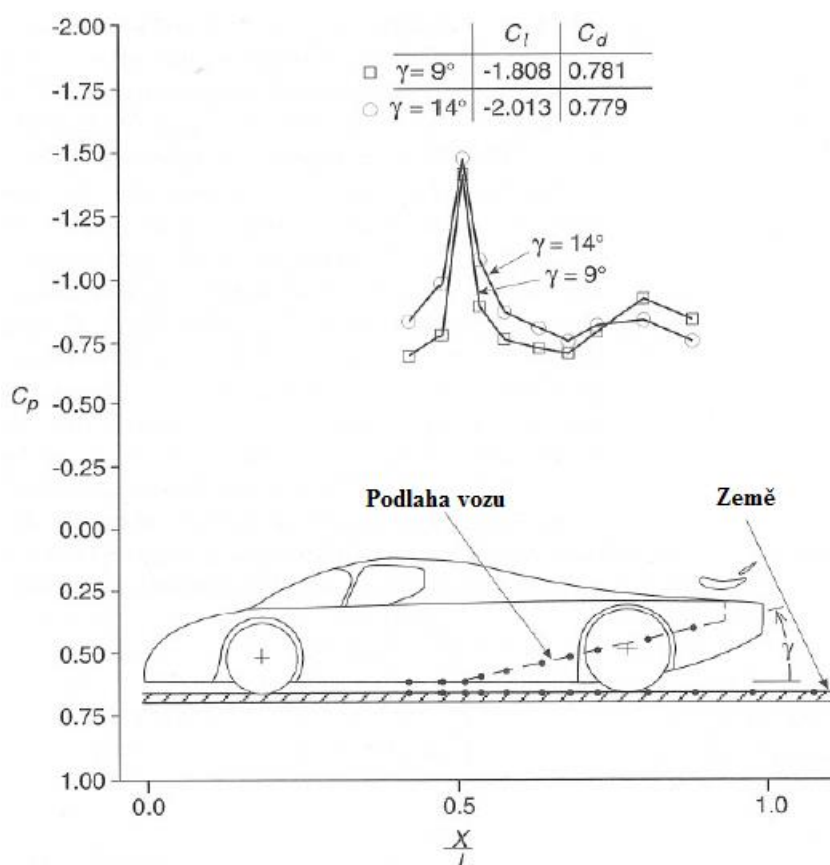
Obr. 17 Tvar Venturiho tunelů, červená oblast [16]

Jak už název napovídá, jedná se o určitý typ Venturiho trubice, o níž se hovořilo v předchozí kapitole. Pro srovnání rozdílu mezi klasickým „plochým“ a tvarovaným podvozkem je zde obr. 18 a jedná se o znázornění průběhu tlakového koeficientu C_p v závislosti na vzdálenosti. Situace vlevo je standartní a obsahuje difuzor, situace vpravo znázorňuje Venturiho trubici skládající se z trysky a difuzoru. Tlakový koeficient je mnohonásobně vyšší u proudění skrz trubici. Proud vzduchu měl v obou případech stejnou rychlost V_∞ .



Obr. 18 Porovnání proudění skrz podvozek s difuzorem a s Venturiho trubicí [3]

Při návrhu Venturiho tunelů se konstruktéři často potýkají s mnoha problémy. Musí se totiž vycházet z vhodné světlé výšky podvozku a nízko položenými komponentami vozu, jako jsou například motor, převodovka atd. Tyto předpoklady však často nenechávají místo pro vytvoření tíženého tvaru podvozku nebo pro vytvoření Venturiho systému s malým sklonem stoupání, který vytváří nižší přísavnou sílu. Sklon stoupání kanálu se značí symbolem γ a je to úhel mezi zemí a sklonem tunelu. Zachycuje ho obr. 19, kde výsledné naměřené koeficienty (odporu a vztlaku) vyobrazují závislost na poloze pod vozidlem. Z grafu přiloženého k obrázku je patrné, že úhel stoupání tunelu $\gamma=14^\circ$ vytváří vyšší hodnotu tlakového koeficientu a následně i vyšší přítlak při velmi podobném odporu. Pomocí úhlu stoupání lze rozlišovat dvě různá chování difuzoru, protože při malém úhlu se mezní vrstva proudění neoddělí od plochy a nedochází ke vzniku vírů za vstupem a k nárůstu odporu. Jedná se o úhly v rozmezí 5deg-10deg. Při vyšším sklonu dochází k separaci mezní vrstvy a také k ulpívání proudění až za vstupem difuzoru a k posunu působistě síly vyvolané přísavným efekt. [3]



Obrázek 19 Úhel sklonu Venturiho tunelů u prototypového automobilu, graf koeficientů vzlaku a odporu [3]

Nejvyšší podtlak je vyvolán v místě vstupu proudícího vzduchu. Umístěním tohoto vstupu lze ovlivnit působíště aerodynamických sil, což je působíště celkové aerodynamické přítlačné síly. Lze hovořit o jakési obdobě těžiště, které je působíštěm gravitační síly. Působíště aerodynamických sil se převážně situuje až za těžiště vozu a to kvůli momentu otáčení, který vzniká při průjezdu zatáčkou nebo přes horizont nebo působením bočního větru.

U vozů lze zvýšit přísavný efekt při vhodném umístění zadního křídla. Dochází zde k přímému propojení přítlačného křídla s difuzorem nebo s Venturiho tunely, kdy se ovlivňuje proudění pod podlahou vozu. Nižší tlak, který se vytváří na spodní straně křídla, vyvolává sací efekt u zadního difuzoru a díky tendenci vyrovnat rozdíl tlaků dochází ke zvýšení průtoku proudu na zadní části podlahy. Tímto lze přítlačnou sílu navýšit až o několik procent. Je potřeba však tyto dva prvky umístit do příznivé polohy, aby se navzájem dostatečně ovlivňovaly. Jedná se o propojení dvou odlišných aerodynamických prvků a opět se zde potvrzuje pravidlo o nutnosti chápání aerodynamiky vozu jako jednotného celku.

Na obr. 20 je podvozek prototypového vozu ze závodu LeMans, který obsahuje Venturiho tunely. Také je vybaven mohutným zadním křídlem, které pumpuje vzduch ze spodní části podvozku a zvyšuje tak přítlačnou sílu. Na dalším obr. 21 je formule 1, která má plochý a rovný tvar podvozku a zadní část vozu obsahuje malý difuzor. Ten však má vyšší průtok vzduchu, kvůli dvojitému křídlu umístěném těsně blízkosti nad difuzorem. Vytvořený podtlak pod spodní lamelou křídla opět urychluje vzduch z dolní části vozu.



Obr. 20 Prototypový automobil Audi, pozice zadního křídla pro zvýšení toku vzduchu difuzorem [17]



Obr. 21 F1 Mercedes MGP W02, umístění zadního dvojitého přítlačného křídla nad difuzorem formule [15]

2.4.4 PŘEDNÍ ČÁST VOZU

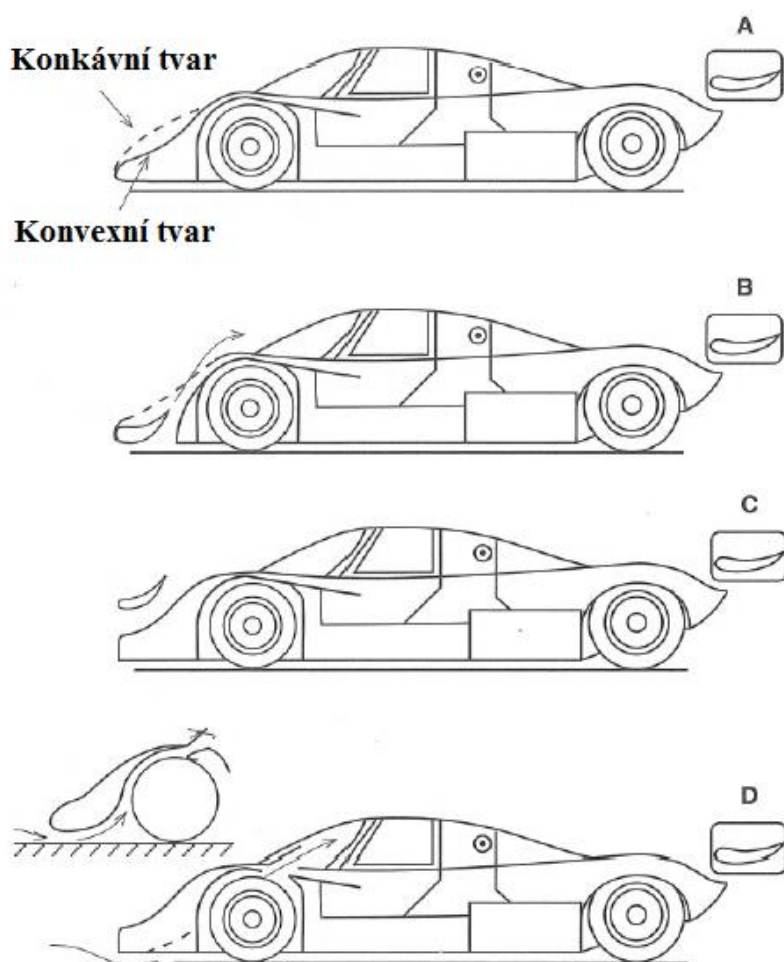
Jako přední část vozu lze chápat přední nárazník (spoiler) u okruhových aut nebo přední přítlačné křídlo u formulí. Jedná se o prvek, který buď vytváří přímo přítlačnou sílu, nebo ji napomáhá změnou proudění či vymezuje prostor pro proudění. U okruhových závodních vozů navíc bývají v přední části hned za spoilerem umístěny chladicí systémy, které odvádějí teplo do okolí. Přední část vozu je velmi důležitá pro celkové proudění vzduchu okolo něj, protože je to část, která je s prouděním v kontaktu jako první a ovlivňuje tak pozdější chování proudu.

Obr. 22 ukazuje několik typů uzavřených vozů (prototypové automobily), u kterých tvar přední části dovoluje značné proudění pod vozem a vytváří tam podtlak, a také samotná přední část vytváří přítlak. Důležitým faktorem je konkávní tvar celé přední karoserie, protože konkávní



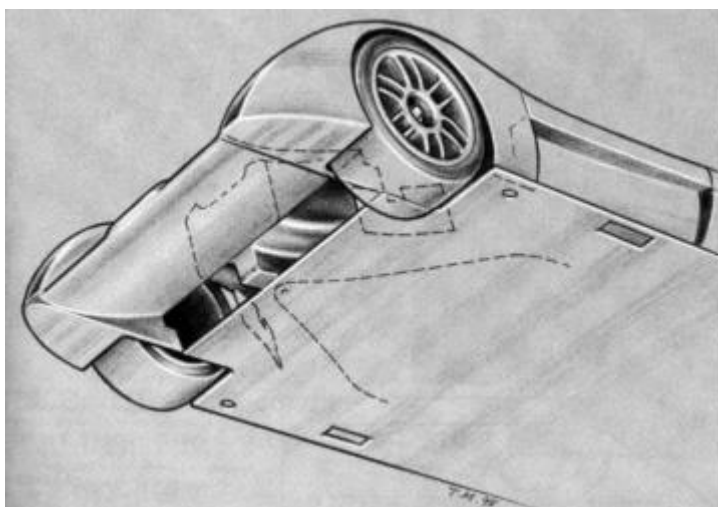
tvary vytváří větší přitlačnou sílu, jak bylo vysvětleno v první kapitole. U varianty A je naznačen jak možný konkávní tvar, tak i konvexní. Příklad B je spojení předního nárazníku s přitlačným křídlem, které vytváří poměrně velký přtlak, avšak vzduch vhná směřem nahoru a proto dochází k úbytku přitlačné síly vytvořené přísavným efektem. Tunely totiž musí nasávat vzduch z boku vozu a jejich účinnost je nižší. V příkladu C je znázorněné přitlačné křídlo v blízkosti karoserie vozu, což způsobuje snížení tlaku pod křídlem a také u povrchu karoserie. Výsledný účinek přitlaku se snižuje, ale odpor vzduchu zůstává stejný, což není optimální.

Další řešení přední části vozu je ukázán v příkladu D, kde vzduch vchází do spodní části vozu, následně je urychlován a proudí okolo předních kol skrz průduchy ven z vozu před čelním sklem. Nicméně velký náustek na předním spoileru sice zvyšuje rychlost proudění, ale zapříčiňuje i nárůst odporu vzduchu. Je vhodné tento průduch umístit mimo hlavní přední nárazník, pak je výsledný odpor mnohem nižší.



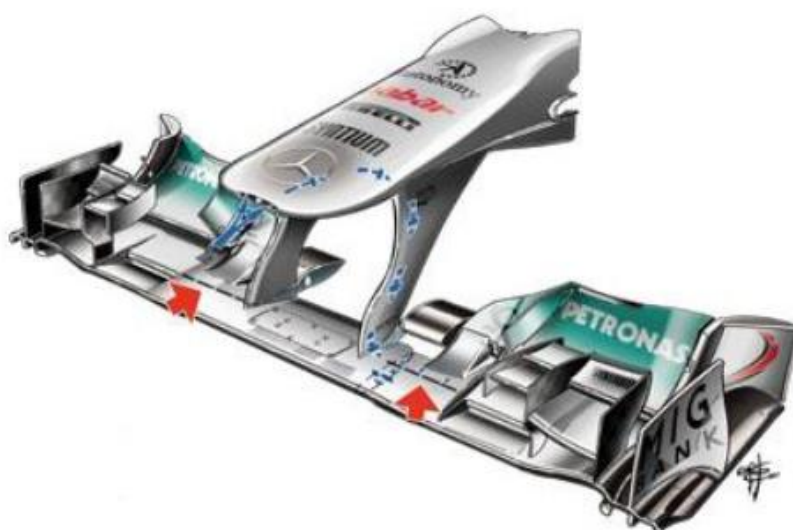
Obr. 22 Různé varianty vytvoření přední přitlačné síly u uzavřených vozů [3]

Jak vypadá řešení podvozku u příkladu D zespod, je ukázáno na obr. 26. Šipky ukazují směr proudu vzduchu, který je přiváděn velkým náustkem. Je zde také patrné, že proud naráží na hranu podvozku. Zde se vytváří odpor a také víry, které následně mění celkové proudění pod podvozkem.



Obr. 23 Příklad tunelového systému v přední části vozu u Toyoty GT - one [18]

Tato část podkapitoly se bude věnovat změnám proudění za předním přitlačným křídlem u formule. Faktem je také, že jen samotné přední křídlo vytváří až třetinový podíl celkové přitlačné síly vozu. Jeho funkcí je usměrňovat proud vzduchu do míst, kde je potřeba, například k předním brzdným kotoučům nebo chladičům pro jejich ochlazování nebo usměrňuje tok proudů do míst, kde se dále využívá pro vytvoření přitlaku. Pomocí předního křídla lze upravit obtékání okolo předních kol. Předí formule vytváří celkové proudění okolo karoserie a v neposlední řadě se jedná o designový prvek. Na obr. 24 je znázorněn předeek formule se směry proudícího vzduchu. Deflektory soustřeďují vzduch do patřičných míst nebo proud odhánějí směrem pryč od vozu.



Obr. 24 Přední přitlačné křídlo monopostu Mercedes MGP W02 [15]

Přední křídlo často obsahuje uprostřed nosu otvor, kterým se dostává vzduch do prostorů pod monopostem a tím není tolik zamezeno vytvoření přísavného efektu. Mezera zde vzniká i díky



konstrukci, proto se křídlo blízko zemi, protože se využívá samotného přísavného efektu vytvořeným pod křídlem.

2.4.5 UTVAŘEČE VÍRŮ

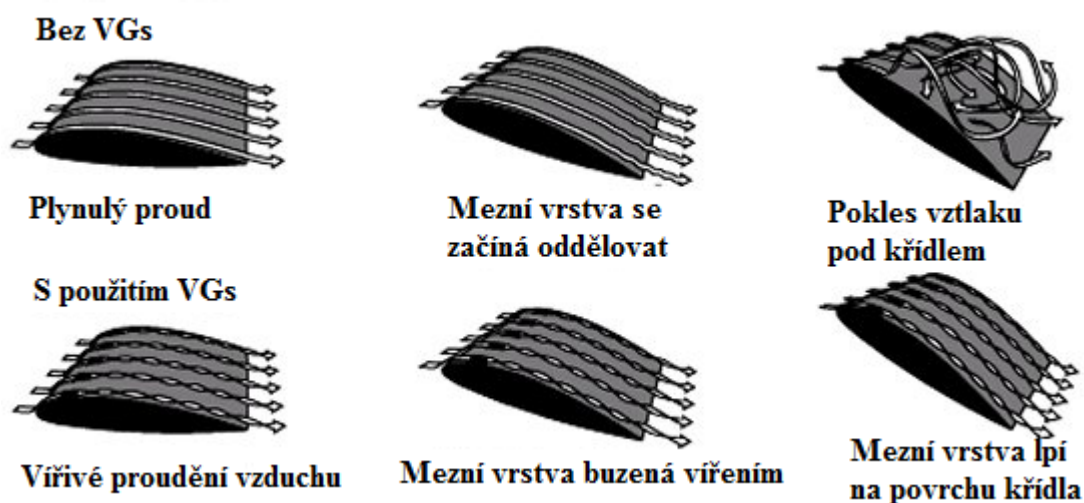
Utvařeče vírů (v angl. vortex generators, zkráceně VGs) byly používány po mnoho let v leteckém průmyslu hlavně pro lepší kontrolu tloušťky mezní vrstvy proudění. V motorsportu tato aplikace přišla o mnoho let později a jedná se o aerodynamické prvky, které se umísťují převážně na přední části vozidla, jak můžeme vidět na předním křídle, obr. 25.



Obr. 25 Utvařeče vírů na předním křídle formule 1 [19]

Proudění kapaliny skrz utvařeče vírů vidíme na obr. 30, kde každý vír je propletený do sebe, a tak déle zůstane přitisknut povrchu křídla. Pro porovnání máme znázorněno stejné křídlo, avšak bez vírových utvařečů a výsledkem je odpojení proudu od povrchu a následný pokles vztlaku křídla.

Vytvořené víry mají pod podvozkem vozu méně markantní význam, ale při vhodné světlé výšce podvozku nabírají na svém významu, protože víry v užším prostoru nabývají na svém zesílení. Nicméně objevuje se zde opět optimální výška, pod kterou se nedoporučuje pokračovat, protože pak dochází k roztříštění víru a následnému zvětšení odporu. Důležitým faktorem je správná poloha a také počet vírových utvařečů. Jejich rozmístění a geometrie se navrhuje v simulačních prostředích.



Obr. 26 VGs umístěné na povrchu křídla [20]

2.5 VLIVY RUŠÍCÍ PŘÍSAVNÝ EFEKT

Přísavný efekt má velký význam pro celkovou přítlačnou sílu vozu. Je nutno s ním počítat při návrhu aerodynamiky jako celku automobilu. Jeho účinnost je však do jisté míry lehce ovlivnitelná.

Jak už ze samé definice přísavného efektu vyplývá, největším faktorem ovlivňujícím celkovou přísavnou sílu je změna průřezu plochy kolmé na podvozek vozidla. To znamená, že pro ideální případ musí prostor pod podvozkem být neměnný a v námi nastavené poloze od začátku až do konce závodu. Toho lze docílit jen velmi obtížně a pro skutečný závod je to téměř nemožné. Znamenalo by to, že vůz by musel být dokonale tuhý. Během závodu totiž na vůz působí setrvačné síly a při průjezdu zatáčkami, najetí přes nerovnosti trati, najetí na obrubníky nebo při kompresi a následné dekompresi při průjezdu přes horizonty se mění světlá výška podvozku a dochází k úbytku přísavné síly. Úhel náklonu se také během závodění mění, a to spolu se zrychlováním nebo brzděním vozu, což má za následek rovněž změnu přítlaku. Náhlá změna přítlaku může vést k nestabilitě vozidla a v extrémních případech může vést až k samotné nehodě.

Stává se také, že při využívání přísavného efektu dojde k odskakování (v angl. Porpoising). Je to stav, kdy vozidlo vlivem zvýšené přítlačné síly na předním křídle se nakloní směrem dopředu, a tím se ještě zvýší přítlak přídi. Dochází k prudkému stažení přední části vozidla a následnému snížení přítlaku vyvolaného přísavným efektem. Následuje odskočení přídi, děj se cyklicky opakuje a poskakování vozu si může všimnout i přihlížející divák. Může dojít i k přímému kontaktu podvozku se silnicí. Tento jev lze eliminovat nebo úplně odstranit zvýšením tuhosti podvozku, což má ale za následek snížení pohodlí pilota a především změnu chování vozu. Opět je zde zřetelná spojitost přísavného efektu s okolní aerodynamikou vozu.

Dalším faktorem ovlivňujícím přísavný efekt je rotace kol. Kola se otáčejí a také pohybují po silnici, což má za následek vytvoření vírů, které se následně pohybují okolo vozu. Mění se i tlak za pneumatikou a tvoří se odpor vzduchu. U některých typů formulí se uvažovalo o využití točících se disků kol jako o turbínách, které by odsávaly vzduch ze spodní části vozu. Předpisy



však tyto úvahy zamítly, a tak se kola nepodílejí na přímém vytvoření podtlaku pod vozem, ale ovlivňují jej.

Další faktory už nemají tak znatelný vliv na účinnost přísavného efektu, ale přece jen stojí za zmínku. Motory a další komponenty závodních vozidel pracují ve vysokých teplotách a ty se odvádějí do okolí. U vozidel s motorem umístěným v přední části tak proud vzduchu je ohříván a následně klesá jeho hustota a mění se jeho chování proudění. Také proměnlivé povětrnostní podmínky na okruzích mohou zasáhnout do výsledného přítlaku. Například velmi vysoké teploty v letním období mění hustotu ovzduší a tím se zvětšuje mezní vrstva, na karoserii vozu se vytváří oblast s vyšším tlakem a účinnost přítlačné síly klesá. Okruhové závody se jezdívají i v deštivém počasí a vzduch, který vchází do spodní části podvozku, obsahuje velké procento vody, což rovněž mění chování proudění.



3 PŘEHLED VOZŮ VYUŽÍVAJÍCÍ PŘÍSAVNÝ EFEKT

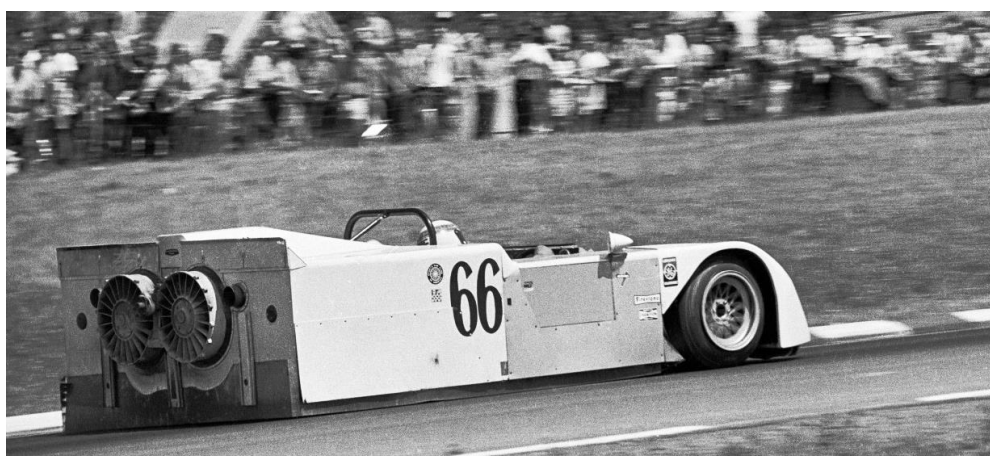
Jak už bylo zmíněno v podkapitole historie přísavného efektu, během konce 20. století aerodynamika vozidla se stávala čím dál více potřebnější pro vytvoření přítláčné síly. Proto je zde uvedeno několik příkladů vozů, využívajících mnoho aerodynamických prvků a hlavně i přísavný efekt. Podotýkám, že se zde objevují i vozy ukázané na předchozích obrázcích, a proto přesný efekt jednotlivých prvků je popsán i v předchozích odstavcích.

3.1 CHAPARRAL 2J

Jedná se o unikátní automobil vyvinutý americkým konstruktérem Jimem Hallem a byl poprvé postaven na závod série Can-Am v roce 1970. Princip byl jednoduchý, do zadní části vozu byly umístěny dva silné ventilátory s průměrem vrtulí okolo 400mm, které měly za úkol vysát co největší množství vzduchu z prostoru pod podvozkem. Byly poháněny samostatným motorem ze sněžného skútru. Prostor mezi zemí a prahy Chaparralu byly utěsněn posuvnými bočnicemi, které ze všech stran lemovaly hrany podvozku a při jízdě se dotýkaly vozovky. Utěsněný prostor začínal těsně za předními koly a pokračoval až do samotné zádi vozu, kde obklopoval zadní kola. Ventilátor tedy odsával vzduch ze spodní části vozu, podobně jako vysavač při úklidu pokoje, a tím způsoboval velmi vysoký přísavný efekt, respektive velmi vysokou hodnotu přítláčné síly.

Formule byla známa i pod přezdívkou „sucker car“. Velice zajímavé bylo jen sledovat jeho nastartování motorů, kdy se vlivem podtlaku snížila světlá výška podvozku díky stlačení pružin. Měl však jepičí život, protože další využívání ventilátorů u formulí bylo koncem sezony zakázáno předpisy. Pro jeho časté technické poruchy nedokázali jezdci vyhrát v celkovém hodnocení, a proto aspoň v jeho jediné sezoně nenabyl valných výsledků.

Chaparral vynikal tedy velmi vysokým přítlakem, při průjezdu zatáčkami mohl mít vyšší rychlost. Mohl projíždět rychleji i v ostřejších zatáčkách, protože hodnota přítlaku nesouvisela s rychlostí vozu. Přetížení v zatáčkách navíc bylo o 0,5g vyšší než u jiných formulí a jezdci dokázali na okruzích zajíždět konstantně až o 2s rychlejší čas.



Obr. 27 Chaparral 2J při závodě v roce 1970 [21]



3.2 LOTUS 78

Lotus 78 byl vyvinut konstruktérem Colinem Chapmanem, a jak už bylo dříve zmíněno, využíval přísátí k zemi pomocí přísavného efektu, nikoli pomocí ventilátorů. Vůz se vyznačoval velice lehkým a úzkým monocoquovým šasi, které bylo vyrobeno z hliníkových voštin. Po obou stranách se nacházely podlouhlé boční Venturiho tunely, které měly tvar obráceného křídla a urychlovaly tok vzduchu. Vznikal tak přísavný efekt a monopost byl při vyšších rychlostech doslova přisán k vozovce. Výsledný přítlak vyvolaný tímto jevem byl ohromující, navíc s nízkým vzrůstem odporu vzduchu.

V pozdějších letech pak byly na prahy formule přidávána těsnění, která byla vyrobena z gumy a v těsné blízkosti se zemí byla opatřena štětinami kartáče pro minimalizaci tření. Prostor Venturiho tunelů tímto byl přesně a těsně vymezený a výsledný efekt nabral na intenzitě. Vůz s označením 78 nicméně byl dost poruchový a jezdcům stále Lotus tak nepřinesl kýžené tituly. Technické problémy byly spojeny s velmi vysokou přítlačnou silou, kdy na monocoquokové šasi působily velké příčné síly a ty vedly ke vzniku trhlin v konstrukci.



Obr. 28 Lotus 78, přezdívaný John Player Special Mk. III [22]

3.3 BRABHAM BR46B

Může se zdát, že formule vyvinutá konstruktérem Gordonem Murrayem pro závodů F1 byla jakousi kopií legendárního Chaparralu. Nastává otázka, jak je možné, že po zákazu aktivních aerodynamických prvků mohl v roce 1978 ještě závodit? Důvod je jednoduchý a geniální. Monopost byl vybaven mohutným ventilátorem umístěným v zadní části, který neměl však za úkol odsávat vzduch z prostor pod vozidlem, jak se může na první pohled zdát, ale odsávat a zvyšovat průtok vzduchu z prostoru chladičů, což už se do rozporu s předpisy nedostává. Ventilátor poháněl samostatný motor, který nebyl závislý na rychlosti vozu.



Monopost BT46B se dodnes považuje za nejchytřejší řešení formulí v historii a má nespočet příznivců. V roce 1978 však mnoho závodů neabsolvoval, přesněji jen čtyři z toho jeden vítězně, a byl stáhnut ze závodního pole kvůli velké kritice ostatních týmů. I přes velké množství prohlídek a kontrole se nedostal do problémů s nařízeními. Kritika se snášela i na velký vír, který za formulí díky silnému ventilátoru vznikal. Navíc proud vzduchu neovlivňoval jen proudění vzduchu u vozů za Brabhamem, ale unášel sebou i množství prachu a kamenů, které pak ohrožovaly zadní jezdce.



Obr. 29 Brabham BT46B, monopost vybavený ventilátorem pro zvýšení toku vzduchu skrz chladiče [23]

3.4 LOTUS 79

V roce 1977 přišel tým Lotus s novými inovacemi a vylepšeními a představil formuli Lotus 79, která byla těžší kvůli výměně hliníkových voštin za hliníkové plechy. Ty konstruktérům týmu také dovolovaly zlepšení celkového aerodynamického tvaru formule a zefektivnění až o 25%. Napomáhalo tomu i umístění chladičů do vyšší části formule, kde z nich odcházel po horní straně karoserie teplý vzduch a vytvářel oblast s vyšším tlakem. Boční tunely však mnoho změn nedostaly a přísávání monopostu k silnici bylo opět velmi vysoké. Hodnota koeficientu vztlaku byla $C_L = -2,6$ [3], což mělo za následek obrovskou přilnavost v průjezdu táhlých zatáček.

Formuli se kvůli jejím jednoduchým křivkám přezdívala Černá krásko a vysloužila si obdiv nejen u fanoušků. V sezoně roku 1978 vyhrál jezdec Andreotti šampionát a na druhém místě skončil sezonu jeho týmový kolega Peterson. Vůz neměl v tomto roce konkurenci a jeho poruchovost byla minimální.

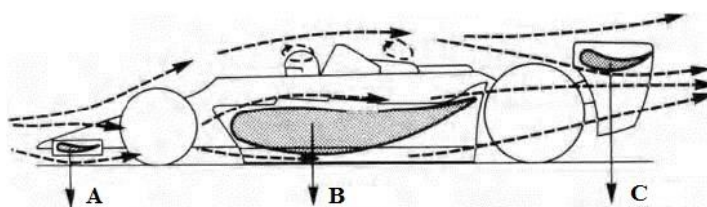


Obr. 30 Lotus 79 z roku 1977 [24]

Body působíště jednotlivých přítlačných síly jsou uvedeny pod body A, B a C. Velikosti přítlačné síly jsou uvedeny v tab. 1. Zajímavostí je, že záporná vztlačková síla tvoří téměř 60% celkového přítlaku a přesouvá hlavní nositelku přítlačné síly víc do středu vozu, což přispívá k lepší stabilitě i ovladatelnosti formule. Obr. 31 znázorňuje působíště přítlaku v přední části, vprostřed a v zadní části vozu.

Tab. 1 Hodnoty přítlačné síly v jednotlivých sekcích [25]

Přední přítlačné křídlo, bod A [N]	efekt, bod B [N]	Zadní přítlačné křídlo, bod C [N]
445	1780	890



Obr. 31 Znázornění působíšť jednotlivých sil přítlaku [25]



3.5 RED BULL RB7

- Motor – Renault RS7 2011
- Objem, počet válců – 2400CC, 6
- Počet ventilů – 32
- Maximální otáčky – 18000 rpm
- Vidlicový šestiválec je umístěný v hliníkové skořepině motoru, váha motoru minimálně 95kg (dle FIA)
- Šasi z kompozitní monocoqueové struktury



Obr. 32 Monopost Red Bull RB7 [26]

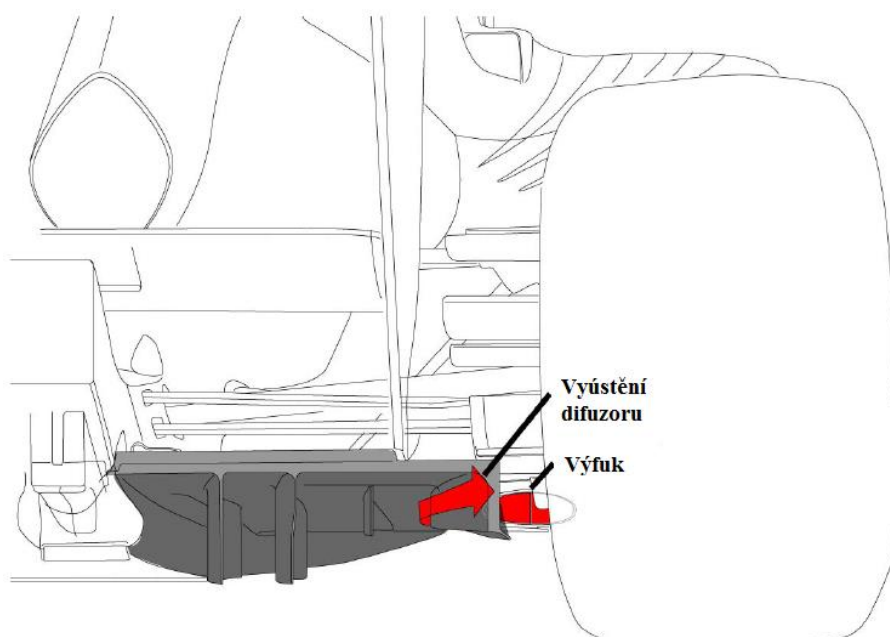
Formule stáje Red Bull byla nasazena v roce 2011 a navrhl ji uznávaný designer Adrian Newey. Tým s piloty Sebastianem Vettelem a Markem Weberem dokázal ovládnout drtivou většinu závodů v sezoně a v konečném zúčtování vyhráli pohár konstruktérů s rekordním počtem bodů.

Formule obsahovala nejmodernější aerodynamické prvky, zadní dvojité přítlačné křídlo, difuzor, sníženou část podlahy, podlahový flipper a tvarově složité přední křídlo. Navíc monopost měl chytře řešené vývody výfukových plynů a také chladicí systém v hodní části vozu.

Snahou bylo zjednodušit a vést přímý proud vzduchu k zadnímu křídlu a difuzoru. Při narovnání proudu došlo k lepšímu obtékání a k vytvoření vyššího přítlaku a naopak ke snížení

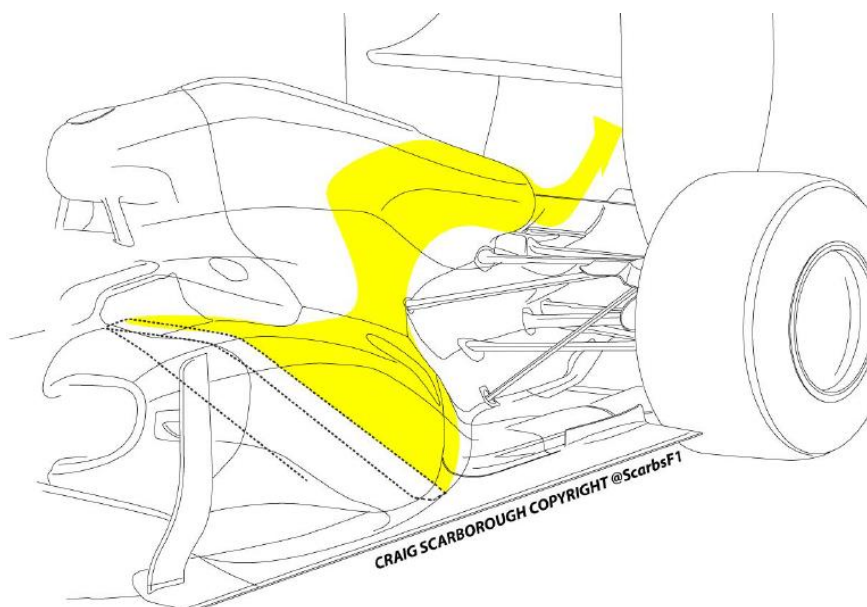


odporu. Pravidla pro rok 2011 značně limitovala navržení podlahy a dovolovala umístění výfuků mezi zadní nápravu ve spodní části, obr 33.



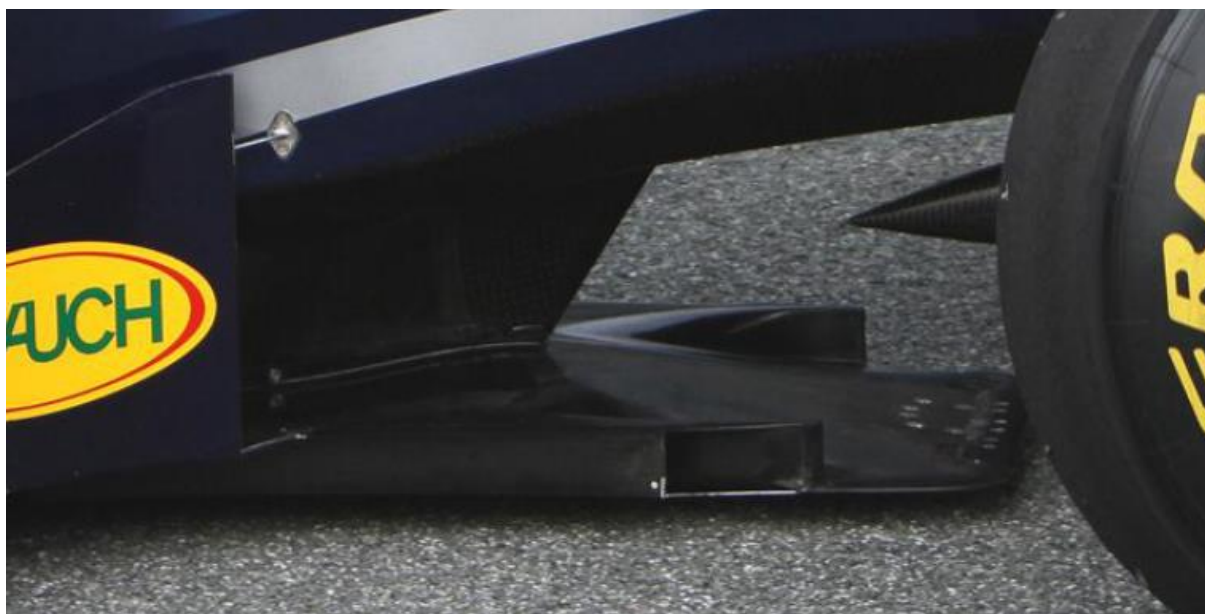
Obr. 33 Řešení zadního vyústění difuzoru a výfuku [15]

U minulých verzí formulí vcházel vzduch od hlavního chladiče do spodní části těsně k podlaze a následně ven za formuli. U modelu RB7 však proud horkého vzduchu směřoval k zadnímu křídlu nad difuzor a během cesty k zádi obtékal okolo zadní části formule, nicméně to způsobovalo příliš velký vír, který navíc způsobil blok u zadních kol a blokem vzduchu u difuzoru. V týmu Red Bull však vyvinuli chladič, který dokáže odvádět vzduch směrem nahoru do středu monopostu, a tak jej poslat ven nad převodovkou vybuleným otvorem. To udržuje proudění v zádi přímé a rovné, obr. 34. Přesto vznikala malý blok vzduchu u zadního křídla, ale při propočtech zjistili, že při tomto případě vzniká vyšší přítlaková síla, vyvolána zadním difuzorem než u předchozí verze formule. Jiné týmy se také snažily napodobnit tuhle myšlenku, stejně u nich přebývaly některé vyústky dole u podlahy monopostu.



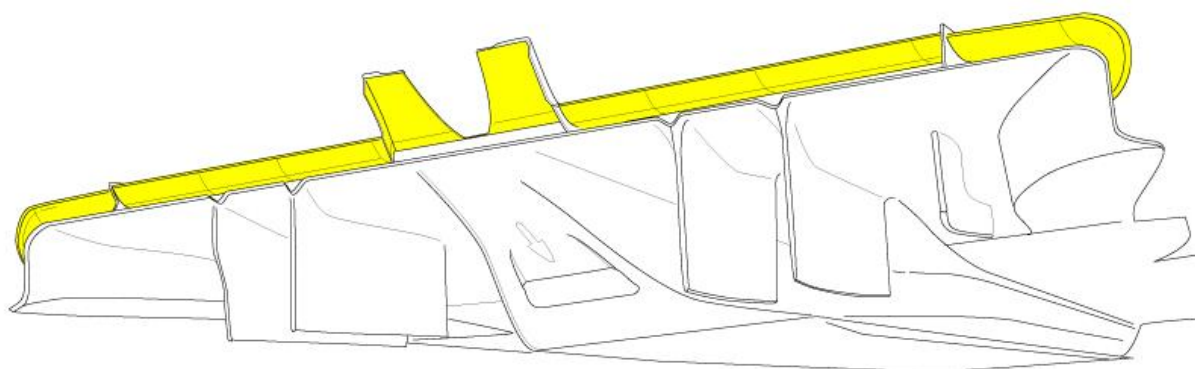
Obr. 34 Proudění vzduchu od chladiče je směřováno do úzkého svazku k zadnímu křídlu [15]

Fliper umístěný v přední části formule je nedílnou součástí mnoha formulí. U typu RB7 doznal určitých změn a nesl dva hlavní úkoly. První spočívalo ve vertikálním bočním ohraničení podvozku, obsahující průduchy, které byly kratší oproti loňské verzi a druhý úkol, ostré a pozvolné vytvoření náběžné hrany. První způsoboval zátěž pro zadní část formule a druhý zase upravoval proud vzduchu vcházející pod podvozek.



Obr. 35 Fliper na podlaze monopostu za přední nápravou [15]

Zadní difuzor se skládal ze tří rozdělovacích ploch na každé ze stran a změna oproti loňskému vozu nastala ve zvětšení a zaoblení klapky u difuzoru. Ty optimalizovaly proud vycházející z podvozku a zabráňovaly vytvoření tlakové blokády. Zvýšil se tím přítlak a upravilo se proudění vycházející z chladičů.



Obr. 36 Zadní difuzor formule RB7 [27]

3.6 McLAREN MP4-26A

- Motor – Mercedes-Benz FO 108Y
- Objem, počet válců – 2400CC, 6
- Počet ventilů – 32
- Maximální otáčky – 1800 rpm
- Vidlicový šestiválec vyrobený z hliníkových slitin, váha 95kg (min. dle FIA)
- Sedmistupňová převodovka
- Carbonová spojka
- Šasi z carbonových McLarenem vytvořených vláken

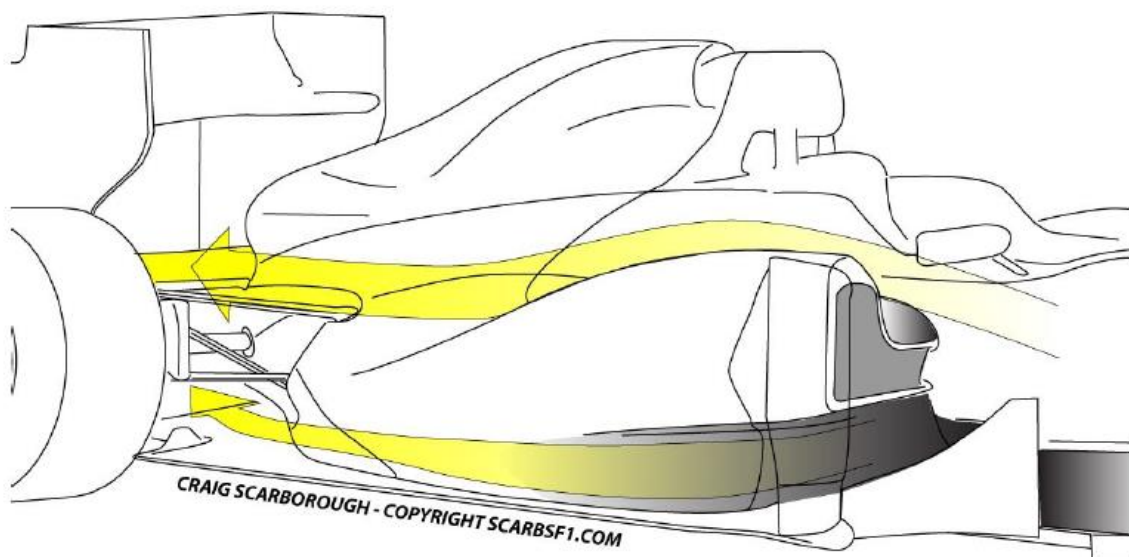


Obr. 37 Monopost McLaren MP4-26A [28]



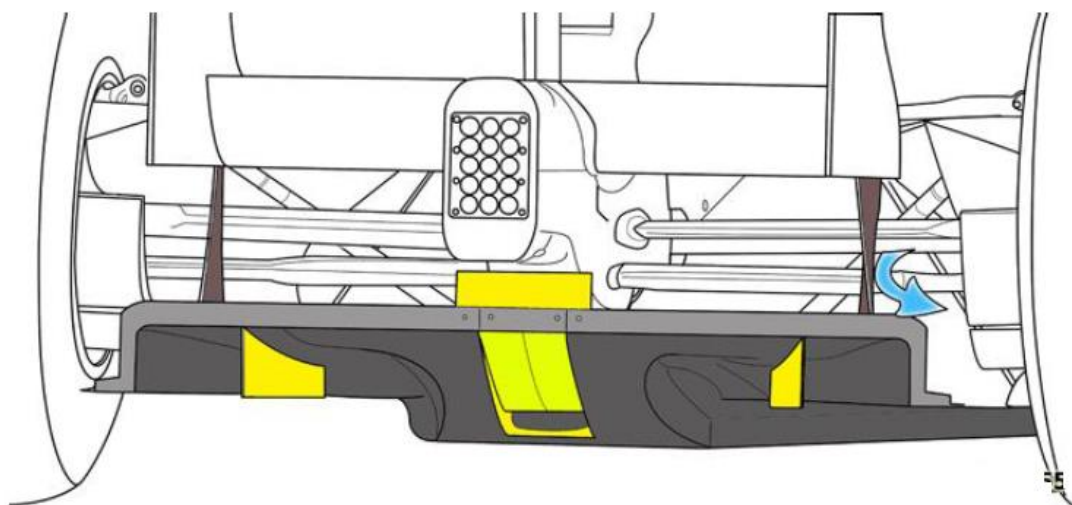
Monopost byl vyvinut v týmu McLaren Formula One a závodil v roce 2011. Pilotovali jej jezdci Lewis Hamilton a Jenson Button, mistr světa pro rok 2008 a 2009. Formule oproti předcházejícímu roku doznala změn souvisejících s tokem vzduchu od chladičů okolo monopostu. Hlavní technik Paddy Lowe vytvořil proudění zakřivené do tvaru „U“, a jak bylo u týmu McLaren zvykem, udělali přesný opak toho, co u ostatních týmů.

Vtok k hlavnímu chladiči vedle kokpitu jezdce byl umístěn daleko od povrchu a dále proud vzduchu směřoval dozadu k přitlačnému křídlu, respektive k spodnějšímu elementu křídla. U jiných týmů bylo typické umístit vtok co nejbližší povrch, kvůli vysoké čistotě a velké energii proudění. To jim dovoľovalo mít malé vtokové náustky, které měly nižší odpor vzduchu. Vtoky umístěné vně karoserie zachytávaly víry turbulentního proudění vytvořené u předních kol. Nápad je v tom, že vzduch proudící okolo kokpitu není tolik odebírán do chladičích systémů a značná jeho část putuje k zadnímu křídlu, kde vytvoří větší přitlačnou sílu. Část proudu putuje i po povrchu podvozku a na závěr vchází na horní stranu difuzoru, obr. 38.



Obr. 38 Proudění vzduchu okolo kokpitu formule MP4-26A [15]

Vývoj zadního difuzoru u McLarenu neprošel mnoho změnami, protože tým ještě neměl hotový návrh týkající se vylepšení výfukové soustavy v zadní části monopostu. Zvažovalo se, zda nasadit bez větších zkoušek nový difuzor nebo se navrátit ke klasickému tvaru. Stávající difuzor navíc poskytoval stálá data o chování horkých plynů v trubkách výfuku. Difuzor se skládá ze dvou rozhazujících desek uvnitř každé sekce. Nad dvěma výstupy difuzoru jsou namontovány hladké desky, které mají za úkol odklonit proud vzduchu k zadním kolům do míst s nižším tlakem pro snížení odporu, modrá šipka u obr. 39.



Obr. 39 Jednoduchý zadní difuzor monopostu McLaren, modrá šipka znázorňuje směr odklonu vzduchu k zadním kolům [15]



ZÁVĚR

Pomocí proudění vzduchu mezi celou spodní částí vozu a zemí se dosahuje vysokých hodnot přítlaku. Najít správné řešení při nastavení vozu pro maximální přítlak, je často otázkou dlouhého vývoje, testování a simulací. Všechny aerodynamické prvky pracující ve spodní části vozu se navzájem ovlivňují, a proto při maximalizaci přítlaku se hledá určitý kompromis všech vlivů. Navíc dosažený čas závisí především na umění jezdce, který potřebuje pro podání maximálního výkonu určitý stupeň bezpečnosti a komfortu. Z poznatků vyplývá, že pro vyvolání maximální přítláčné síly na vozidlo, se musí řešit celá technická stránka vozu, od pneumatik až po samotnou konstrukci šasi.

Doufám, že obsáhlost této práce nebude ke škodě, ale naopak přispěje k lepšímu pochopení této problematiky a uvedené příklady poskytnou konkrétní představu o skutečných závodních speciálech. Navíc poslední dva příklady formulí v třetí kapitole jsou ze stejného roku a mohou posloužit jako modely pro porovnání technologií různých týmů. Také je potřeba si uvědomit, že vývoj aerodynamiky stále jde kupředu a bude při nejmenším zajímavé sledovat, s jakou novou myšlenkou se v budoucnu setkáme.

Tuto práci je možné použít, jako obecný návod pro navržení podvozku za účelem zvýšení přítláčné síly pomocí přísavného efektu. Posloupnost jednotlivých sekcí postupuje chronologicky a odpovídá obecnému postupu při návrhu podvozku.



POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] Captions for Minneapolis 500 photos. *THE MINNEAPOLIS 500*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.gotomn.com/racing/minn500.htm>
- [2] Indycar INDY 500. *motorsport.com*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.motorsport.com/indycar/news/honda-s-2015-indycar-aero-kit-unveiled/>
- [3] KATZ, Joseph. *Race car aerodynamics: designing for speed*. Cambridge, MA, USA: R. Bentley, c1995. ISBN 0837601428.
- [4] *Ecomodder*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://ecomodder.com/forum/showthread.php/perfect-aero-shape-but-unimpressive-cd-mercedes-c-27257.html>
- [5] JAHODA, M. *Hydromechanické procesy: Obtékání těles* [online]. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://uchi.vscht.cz/uploads/pedagogika/hydro/obtekani.teles.pdf>
- [6] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. *Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. Brno: Vutium, c2000. ISBN 80-214-1868-0.
- [7] Bakalářská fyzika pro HGF VŠB-TUO. *Bernoulliho rovnice*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://if.vsb.cz/bf/39.html>
- [8] New 2013 F1 aerodynamics formula. *F1 technical*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.f1technical.net/forum/viewtopic.php?t=8927&start=15>
- [9] *Profil a jeho aerodynamické charakteristiky*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://lu.fme.vutbr.cz/ucebnice/opory/aerodynamics.php>
- [10] Photographs. *Conceptcarz*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: http://www.conceptcarz.com/view/photo/568940,4907/2002-Cadillac-Le-Mans_photo.aspx
- [11] Archive. *Papots-motorsport*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: http://papots-motorsports.blogspot.cz/2015_02_01_archive.html
- [12] MCBEATH, Simon. *Competition car aerodynamics*. Newbury Park, Calif., USA: Haynes North America, 2006. ISBN 1844252302.
- [13] Formula One. *motorsport.com*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.motorsport.com/all/photo/main-gallery/possible-rendering-of-the-ferrari-f1-2016-with-a-1975-livery-highlighted-with-white-area-6316805/?a=673465>
- [14] Corvette z06. *Corvetteconti*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.corvetteconti.com/blog/?p=19430>
- [15] MADIÉ, Dominique. *F1 Season 2011 – Aerodynamic and mechanical updates*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.f1-forecast.com/pdf/F1%20Season%202011%20-%20Aerodynamic%20and%20Mechanical%20Updates.pdf>



- [16] Ground Effect in Formula 1. *Autoevolution*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.autoevolution.com/news/ground-effects-in-formula-1-6717.html>
- [17] Audi using blow diffuser concept on R18. *Racecar Engineering*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.racecar-engineering.com/news/audi-using-blown-diffuser-concept-on-r18/>
- [18] Toyota GT one. *mulssanescorner.com*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.mulsannescorner.com/GTOneundertray.html>
- [19] Front wing – vortex generators. *F1 technical*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.f1technical.net/forum/viewtopic.php?t=10205>
- [20] Hydrodynamics and aerodynamics. *Boatdesing*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.boatdesign.net/forums/hydrodynamics-aerodynamics/catamarans-high-speed-blow-over-causes-solutions-48276-12.html>
- [21] Chaparral race cars. *HemmingsDaily*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://blog.hemmings.com/index.php/2014/11/14/chevrolet-brings-jim-halls-chaparral-race-cars-to-a-new-generation/>
- [22] Lotus 78 gallery. *Cars Image Encyclopedia*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://bright-cars.com/page/lotus-78/default.html>
- [23] Brabham BT46B – Fan Car. *Jps Lotus*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.jpslotus.org/bt46/bt46pix.htm>
- [24] Galerry. *Best car magazine*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://bestcarmag.com/makes/Lotus/79>
- [25] F1 car downforce and fluid dynamics. *Adsves Weebly*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://adsves.weebly.com/dynamics/aerodynamic-downforces-on-fl-racing-car-at-150-m-ph>
- [26] Red Bull RB7. *F1 fanatic*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: http://www.f1fanatic.co.uk/2011/02/01/red-bull-rb7-launch-first-pictures/redbull_rb7_2011_studio/
- [27] Red Bull RB7. *ScarbsF1*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <https://scarbsf1.wordpress.com/category/red-bull-rb7/>
- [28] McLaren MP4-26A . *F1 fanatic*. [online]. 26.5.2016 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: http://www.f1fanatic.co.uk/2011/02/04/mclaren-mp4-26-launch-first-pictures/mclamp246_studio_34/



SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

C_D	[-]	koeficient odporu
C_L	[-]	koeficient vztlaku
C_P	[-]	tlakový koeficient
C_Y	[-]	koeficient boční síly
μ	[-]	dynamická viskozita
D	[N]	síla odporu
F	[N]	síla
g	[ms ⁻²]	tíhové zrychlení
h	[m]	světlá výška podvozku
L	[N]	vztlková síla
l	[m]	délka
P	[Pa]	tlak
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
S	[m ²]	účinný průřez tělesa
V	[ms ⁻¹]	rychlost
Y	[N]	boční síla
z	[m]	výška hladiny v trubici
α	[°]	Úhel nákonu podvozku
γ	[°]	úhel sklonu Venturiho tunelů
ν	[-]	kinematická vizkozita
ρ	[kgm ⁻³]	hustota
τ	[Pa]	tečné napětí